

Janayna Dias Motta

**BASES BIOLÓGICAS DA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA, COM
FOCO NO RADIODIAGNÓSTICO DE PACIENTES
PEDIÁTRICOS: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado para obtenção da certificação de Especialista pelo Programa de Pós-Graduação em Proteção Radiológica e Segurança de Fontes Radioativas do Instituto de Radioproteção e Dosimetria da Comissão Nacional de Energia Nuclear.

Orientador: Prof. Ana Cristina Murta Dovalles - IRD/CNEN

Rio de Janeiro – Brasil

Instituto de Radioproteção e Dosimetria – Comissão Nacional de Energia Nuclear

Coordenação de Pós-Graduação

2014

Ficha Catalográfica

T

539.77 Motta, Janayna Dias

M921p Bases Biológicas da Proteção Radiológica, com foco no radiodiagnóstico de pacientes pediátricos: uma revisão bibliográfica, defendida e aprovada no IRD / Janayna Dias Motta – Rio de Janeiro: IRD, 2014.
XI, 52 f., 29,7 cm: 17 il.

Orientadora: Ana Cristina Murta Davales

Dissertação (Lato Sensu) – Instituto de Radioproteção e Dosimetria. Rio de Janeiro, 2014.

Referência bibliográficas: f. 49-52

1. Proteção radiológica 2. Radiações ionizantes 3. Efeitos biológicos. 4. Radiologia pediátrica I. Título

Janayna Dias Motta

**BASES BIOLÓGICAS DA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA, COM
FOCO NO RADIODIAGNÓSTICO DE PACIENTES
PEDIÁTRICOS: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Rio de Janeiro, 30 setembro de 2014.

Prof. M.Sc. Ana Cristina Murta Dovalles – IRD/CNEN

Prof. D. Sc. Karla Cristina de Souza Patrão – IRD/CNEN

Prof. D. Sc. Eduardo de Paiva – IRD/CNEN

O presente trabalho foi desenvolvido no Instituto de Radioproteção e Dosimetria da Comissão Nacional de Energia Nuclear, sob orientação da Prof. Ana Cristina Murta Dovalés.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Pádua Diniz Dias e Willan Motta.

AGRADECIMENTOS

É difícil agradecer todas as pessoas que de algum modo, nos momentos bons e ou ruins, fizeram ou fazem parte da minha vida, por isso agradeço a todos de coração.

Agradeço, aos meus pais, Pádua Diniz Dias e Willan Motta pela determinação e luta na minha formação. A minha avó Conceição de Maria Diniz por todo carinho, ao meu irmão Daniel Dias pela convivência e amparo no dia a dia e ao Sandro Lima, pessoa com quem amo compartilhar a vida.

Agradeço a minha orientadora professora Ana Cristina Murta Davales pela paciência, pelo incentivo, pela amizade e excelente orientação que tornou possível a realização desse trabalho.

Agradeço aos coordenadores Aucyone Augusto e Almir Faria pelos conselhos e incentivos.

Agradeço a todos professores do curso Latu-sensu por proporcionarem conhecimentos técnico-científicos ministrados.

Agradeço a Maria Ignez, Luciana Vieira e Joemir Conrado por todo carinho, paciência e incentivo.

Agradeço aos amigos da Pós-Graduação Latu-sensu em proteção radiológica e segurança de fonte radioativas IRD, 2014. Com vocês que compartilhei as angústias, alegrias, felicidades e tantas outras coisas que uma amizade faz.

A Deus pois sem ele nada seria possível.

E a todos que contribuíram de forma direta e indireta para realização desse trabalho.

RESUMO

As radiações ionizantes transferem energia para a matéria, podendo causar excitação ou ionização dos átomos componentes dos órgãos ou tecidos. Todas as moléculas biológicas podem ser modificadas pela radiação, mas as moléculas de DNA são aquelas nas quais as lesões produzidas podem gerar efeitos biológicos mais graves. As lesões no DNA são geralmente reparadas, mas quando o reparo falha, consequências a nível celular podem ocorrer. Os danos a nível celular, por sua vez, podem causar efeitos orgânicos ou sistêmicos no indivíduo irradiado: efeitos determinísticos, causados pela morte celular ou pelo atraso/interrupção na divisão celular, ou efeitos estocásticos, causados por mutações ou transformação celular.

Os efeitos determinísticos se caracterizam por apresentar um limiar de dose, abaixo do qual o efeito não se manifesta, e incluem queimaduras na pele, perda de cabelo, alterações no sistema sanguíneo e as síndromes agudas da radiação ionizante, entre outros. Os efeitos estocásticos, englobando efeitos hereditários e câncer, não apresentam limiar de dose. O câncer é considerado, sob uma perspectiva de saúde pública, o efeito mais importante causado pela radiação ionizante na saúde.

Apesar desses efeitos adversos, o uso da radiação ionizante tem trazido grandes benefícios para a sociedade. Em particular, as aplicações da radiação em medicina cresceram intensamente nas últimas décadas, sendo atualmente responsáveis pela maior parte da dose média de radiação *per capita*.

O objetivo da proteção radiológica é minimizar os potenciais efeitos danosos associados ao uso das radiações ionizantes sem limitar seus benefícios. O sistema de proteção radiológica, estabelecido pela ICRP e fundamentado no modelo de risco de linearidade dose-efeito, sem limiar de dose, tem como princípios básicos a justificação, a otimização e a limitação de doses.

A aplicação desses princípios na proteção radiológica é apresentada e discutida, com ênfase nas aplicações médicas, em particular, no radiodiagnóstico pediátrico.

Palavras chaves: radiação ionizante, efeitos biológicos da radiação ionizante, proteção radiológica, radiologia pediátrica.

ABSTRACT

Ionizing radiation transfers energy to matter, causing excitation or ionization of organs or tissues atoms. All molecules in the biological milieu can be modified by radiation, but DNA is the one in which the lesions produced may generate more severe biological effects. DNA lesions are generally repaired, but when repair fails, consequences at the cellular level may appear. Cellular damage may in turn cause organic or systemic effects in irradiated individuals: deterministic effects, caused by cell death or by the delay/interruption of cell division, or stochastic effects, caused by mutations or cellular transformation.

Deterministic effects are characterized by a threshold dose below which the effect dose nor appear, and include skin burns, hair loss, changes in blood system and radiation acute syndromes, among others. Stochastic effects, encompassing hereditary effects and cancer, have no threshold dose. Cancer is considered the most important effect caused by ionizing radiation on health, under a public health perspective.

Despite these adverse effects, the use of ionizing radiation has brought great benefits to society. In particular, use of radiation in medicine has grown steeply in the last decades, being now responsible for the largest fraction of the average dose *per capita*.

The aim of radiological protection is to minimize the potential harmful effects of ionizing radiation without limiting its benefits. The system of radiological protection, established by ICRP on the basis of dose-risk linearity, non-threshold dose model, includes the basic principles of justification, optimization and dose limitation.

The application of these principles in radiological protection is presented and discussed, with emphasis on medical applications, especially pediatric radiology.

Keywords: ionizing radiation, biological effects of ionizing radiation, radiological protection, pediatric radiology

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	2
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
3.1. Efeitos biológicos da radiação ionizante	3
3.1.1. Efeitos moleculares.....	3
3.1.1.1.Efeitos diretos e indiretos	4
3.1.1.2.Danos ao DNA	4
3.1.1.3.Reparo dos danos ao DNA.....	7
3.1.2. Efeitos celulares.....	8
3.1.2.1.Atraso ou parada do ciclo celular	8
3.1.2.2.Morte celular	9
3.1.2.3.Mutação e transformação celular	10
3.1.3. Efeitos sistêmicos	10
3.1.3.1.Efeitos determinísticos	10
3.1.3.2.Efeitos estocásticos	12
3.1.3.2.1. Efeitos hereditários	12
3.1.3.2.2. Câncer	13
3.2. Evidências da indução de câncer pela radiação	14
3.2.1. Histórico	14
3.2.2. Estudo dos sobreviventes de Hiroshima e Nagasaki (LSS)	15
3.2.3. Estudos com crianças submetidas à radioterapia	17
3.2.4. Estudos com sobreviventes do acidente nuclear de Chernobyl	19
3.2.5. Estudos após a exposição a baixas doses de radiação	19
3.2.6. Estudos após a exposição a raios X com finalidade diagnóstica	19
3.2.7. Estudo após exposição à tomografia computadorizada na infância.....	20

3.3. Exposições médicas para fins de diagnóstico	22
3.3.1. Tomografia computadorizada	22
3.3.2. Tomografia computadorizada na infância e adolescência	24
3.4. Proteção radiológica.....	25
3.4.1. Histórico	25
3.4.2. A ICRP	28
3.4.3. O sistema de proteção radiológica da ICRP	29
3.4.4. Regulamentação da proteção radiológica no Brasil.....	30
3.5. Proteção radiológica em radiodiagnóstico.....	31
3.5.1. Tipos de exposição.....	31
3.5.2. Princípios básicos de proteção radiológica.....	32
3.5.2.1. Justificação	32
3.5.2.2. Otimização	33
3.5.2.3. Limitação das doses individuais	34
3.5.3. Requisitos administrativos e operacionais.....	34
3.6. Proteção radiológica nas exposições médicas em radiodiagnóstico.....	35
3.6.1. Justificação genérica das práticas.....	35
3.6.2. Justificação das exposições individuais.....	36
3.6.2.1. Diretrizes para a prescrição de exames.....	37
3.6.3. Otimização das exposições médicas.....	38
3.6.3.1. Níveis de referência de dose.....	40
3.6.4. Educação e treinamento.....	41
3.6.4.1. A campanha <i>Image Gently</i>	41
4. MATERIAL E MÉTODOS	47
5. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO	48
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação esquemática da estrutura do DNA	5
Figura 2. Representação esquemática: quebra de fita simples e quebra de fita dupla.....	6
Figura 3. Representação esquemática do ciclo celular	9
Figura 4. Dano severo na pele devido a uma exposição prolongada de fluroscopia	11
Figura 5. Representação esquemática do desenvolvimento do câncer	13
Figura 6. Câncer nas pintoras de mostradores de relógio com tinta radioativa.....	15
Figura 7. Função dose-resposta da indução de tumores sólidos nos indivíduos expostos à radiação ionizante nas explosões atômicas de Hiroshima e Nagasaki, em 1945	16
Figura 8. Estimativas de risco de indução de tumores sólidos (em excesso) nos indivíduos expostos à radiação ionizante nas explosões atômicas de Hiroshima e Nagasaki, em 1945, de acordo com a idade na exposição	17
Figura 9. Risco relativo de câncer de tireoide após radioterapia na infância.....	18
Figura 10. Risco relativo de leucemia e tumores de cérebro em função da dose absorvida na medula óssea e cérebro, respectivamente	21
Figura 11. Crescimento do uso da radiação em medicina nos Estados Unidos (1980-2006)	23
Figura 12. Variação das doses absorvidas em diferentes órgãos em exames de tomografia computadorizada de crânio ou de abdômen, de acordo com a idade do paciente	24
Figura 13: Recomendações do Comitê Internacional de Proteção aos Raios-X e ao Rádio para indivíduos ocupacionalmente expostos	27
Figura 14. Perda de cabelo após exposição à tomografia computadorizada.....	38
Figura 15: Artigo na imprensa sobre o uso abusivo e risco em tomografia computadorizada	42
Figura 16: Recomendações do <i>Image Gently</i> em tomografia computadorizada.....	43
Figura 17: Recomendações do <i>Image Gently</i> em radiologia digital pediátrica.....	45

1. INTRODUÇÃO

Poucos anos após a descoberta dos raios X e da radioatividade, no final do século XIX, se iniciaram relatos sobre queda de cabelo, dermatites, catarata, leucemia, tumores de pele e outros efeitos adversos à saúde decorrentes da exposição à radiação ionizante. Apesar de algumas medidas protetoras terem sido logo sugeridas, vários anos se passaram até sua efetiva implementação e a criação dos primeiros comitês de proteção radiológica, na década de 1920.

A partir da década de 1950, o avanço no conhecimento sobre os efeitos biológicos da radiação ionizante e a evolução dos métodos de proteção radiológica, incluindo o uso de feixes colimados, blindagens adequadas, equipamentos de proteção individual e monitoração individual, entre outros, resultou em uma grande diminuição dos casos de doenças relacionadas à exposição à radiação ionizante, principalmente em indivíduos ocupacionalmente expostos. Por outro lado, as aplicações benéficas da radiação ionizante são amplamente reconhecidas e tem apresentado grande crescimento nas últimas décadas, em áreas como a indústria convencional e nuclear, a agricultura, a pesquisa e a medicina, entre outras. Em particular, tem sido observado um intenso crescimento do uso da radiação ionizante em medicina, principalmente para fins de diagnóstico. Vários trabalhos têm sugerido uma associação entre essas exposições e um aumento na incidência de câncer nas populações, principalmente quando as exposições ocorrem na infância e na adolescência.

Assim, o conhecimento dos efeitos biológicos da radiação e dos princípios básicos e operacionais de proteção radiológica é fundamental para minimizar os potenciais efeitos danosos associados ao uso das radiações ionizantes, sem contudo limitar seus benefícios. Atenção especial deve ser dada à proteção radiológica nas exposições médicas, em particular na radiologia pediátrica, de modo a garantir um diagnóstico de alta qualidade evitando ao máximo os potenciais efeitos danosos.

2. OBJETIVO

O objetivo geral desse trabalho é apresentar e discutir os efeitos biológicos da radiação ionizante e os princípios básicos e operacionais da proteção radiológica, com foco nas exposições médicas, e em particular, na radiologia pediátrica.

A partir de uma revisão na literatura são apresentados os principais efeitos biológicos da radiação, desde a etapa de deposição da energia no meio biológico até o surgimento de efeitos clínicos. É dada especial atenção à indução de câncer pela radiação ionizante, visto que este efeito não pode ser completamente evitado e, sob uma perspectiva de saúde pública, é o efeito danoso mais importante causado pela radiação ionizante.

Os princípios fundamentais e operacionais da proteção radiológica são apresentados e discutidos, sendo dada ênfase na sua aplicação em medicina, em particular, para fins de diagnóstico pediátrico.

Espera-se que esse trabalho seja uma fonte de referência para alunos e profissionais interessados em proteção radiológica, principalmente na área médica.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO IONIZANTE

Os efeitos biológicos das radiações se iniciam quando a radiação interage com o meio biológico, transferindo energia para esse meio e danificando moléculas de importância biológica, como o DNA (ácido desoxirribonucleico). Os danos moleculares podem então resultar em modificações na forma ou função das células afetadas, o que por sua vez pode ter consequências para os órgãos e tecidos afetados, ou para o indivíduo como um todo.

Esses efeitos dependem da dose e taxa de dose, do tipo da radiação, da região irradiada, e de outros diferentes fatores, como o sexo e idade do indivíduo. De modo geral, podemos classificar os efeitos das radiações ionizantes na saúde em determinísticos ou estocásticos, quando decorrentes respectivamente da morte ou mutação/transformação celular. Os efeitos biológicos da radiação também podem ser classificados em agudos ou tardios, de acordo com o intervalo entre a exposição e o aparecimento dos efeitos, e em somáticos ou hereditários, dependendo se o dano ocorreu em uma célula somática ou em células da linhagem germinativa.

3.1.1. Efeitos moleculares

As radiações ionizantes transferem energia para a matéria, podendo causar excitação ou ionização dos átomos componentes.

Define-se excitação o processo no qual um dos elétrons do átomo receptor de energia migra de suas orbitais de equilíbrio (mais interna) para outra mais externa e, ao retornar, emite a energia excedente sob a forma de luz ou raios X característicos.

No processo de ionização, elétrons são removidos de suas orbitais pelas radiações ionizantes, resultando em elétrons livres de alta energia e íons positivos, que podem se recombinar entre si ou com outros íons.

Esses processos podem ocorrer nos átomos e moléculas que constituem os seres vivos. Uma das consequências pode ser a geração de radicais livres, como por exemplo pela radiólise de moléculas de água. Os radicais livres são átomos ou moléculas com carga elétrica neutra, que possuem um único elétron sem um par correspondente na camada externa, sendo assim muito reativos (TAUHATA *et al*, 2014; HALL & GIACCIA, 2006).

3.1.1.1. Efeitos diretos e indiretos

O dano molecular provocado pela radiação ionizante pode ser direto ou indireto.

O mecanismo direto ocorre quando a radiação interage diretamente com as moléculas de importância biológica, como proteínas, lipídeos, carboidratos e ácidos nucleicos, causando ionização ou excitação de seus átomos.

O mecanismo indireto ocorre principalmente quando a radiação quebra moléculas da água (radiólise), produzindo radicais livres. Os radicais livres podem se difundir rapidamente e interagir com moléculas de importância biológica, danificando-as. Esse mecanismo é muito importante, uma vez que os seres vivos apresentam cerca de 70% de água na sua composição e assim existe uma grande probabilidade de a molécula de água ser a mais atingida pela radiação ionizante. O mecanismo indireto é o responsável pela maioria dos danos induzidos por radiações de baixo LET (transferência linear de energia), como os raios X e gama, sendo esses danos provocados principalmente pela ação de radicais livres do tipo hidroxila, gerados pela radiólise da água (TAUHATA *et al*, 2014; HALL & GIACCIA, 2006).

3.1.1.2. Danos ao DNA

Todas as moléculas biológicas podem ser modificadas pela radiação, mas as moléculas de DNA são aquelas nas quais as lesões induzidas pela radiação podem produzir efeitos biológicos mais graves. As lesões no DNA podem ter diferentes consequências a nível celular, e essas alterações celulares por sua vez podem causar efeitos orgânicos ou sistêmicos no indivíduo irradiado.

O DNA é a molécula chave no processo de estabelecimento de danos biológicos pela radiação ionizante. Essa molécula é responsável por carregar toda informação genética de um indivíduo, estando envolvida na codificação de todos os componentes celulares e na transmissão da informação genética para as células filhas. A informação contida no DNA, de modo geral, está representada apenas uma vez em cada célula, e assim, danos ao DNA podem resultar na perda definitiva de informações importantes. Em contraste, outras moléculas de importância biológica, como por exemplo proteínas, carboidratos e lipídeos, geralmente estão presentes em múltiplas cópias em cada célula, e assim, quando os danos não são extensos, podem ser compensados pela existência de outras cópias da molécula afetada (JUNQUEIRA & CARNEIRO, 2012).

O DNA é formado por duas longas cadeias que formam uma dupla hélice, conforme representado na figura 1. Cada cadeia (fita) é um longo polímero de nucleotídeos, formados por moléculas intercaladas de açúcar (deoxirribose) e fosfato, unidas por ligações covalente do tipo fosfodiéster. Ligada a cada molécula de açúcar está uma de quatro bases nitrogenadas, timina, adenina, citosina ou guanina. Cada base nitrogenada se liga, por pontes de hidrogênio, a uma base complementar na outra cadeia: adenina com timina, citosina com guanina (Figura 1). Esta característica do DNA é fundamental para diversos processos celulares, como a duplicação e a transcrição do DNA, assim como para o reparo de danos nessa molécula. A sequência de bases ao longo da molécula de DNA constitui a informação genética, e qualquer alteração nessa sequência pode ter importância biológica (JUNQUEIRA & CARNEIRO, 2012).

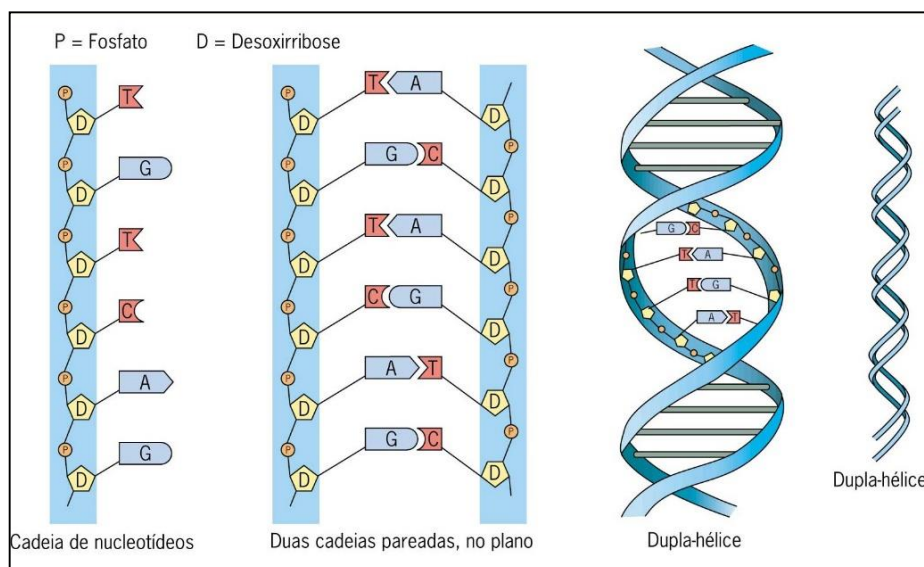


Figura 1. Representação esquemática da estrutura do DNA.
 Fonte: <http://pequenosbiologos.files.wordpress.com/2010/09/dna.jpg>

Danos ao DNA são eventos bastante comuns durante a vida celular, sendo causados por agentes biológicos, químicos ou físicos, de origem endógena ou exógena. Estima-se que cerca de 100.000 lesões por célula possam ocorrer a cada dia, mas a maioria dessas lesões são reparadas por vias de reparo de DNA (HALL & GIACCIA, 2006).

A radiação ionizante pode causar vários tipos de danos ao DNA, por ação direta (ionização) ou indireta (por meio do ataque de radicais livres). Entre esses danos se destacam (TAUHATA *et al.*, 2014; HALL & GIACCIA, 2006):

- Danos nas bases nitrogenadas: Esse tipo de dano é o efeito mais comum da radiação ionizante sobre o DNA, e ocorre principalmente devido aos danos oxidativos causados pela interação dos radicais livres com as bases nitrogenadas do DNA. Na maioria dos casos esses danos são facilmente reparados por sistemas celulares de reparo do DNA, que usam a fita de DNA complementar como molde.
- Quebras de fita simples: As lesões de fita simples ocorrem quando há quebra em uma das duas cadeias do DNA, como representado na figura 2. O número de lesões de fita única aumenta linearmente com a dose de radiação em um grande intervalo de doses (0,2-60 Gy), mas não está diretamente relacionado com a taxa de morte celular. Essas lesões também podem ser reparadas com base na complementariedade entre as fitas de DNA.
- Quebra de fita dupla: As lesões de fita dupla ocorrem quando há lesões nos dois filamentos de DNA, em uma distância não superior a alguns nucleotídeos, como representados na figura 2. As quebras duplas na hélice de DNA são um tipo perigoso de dano, pois podem dificultar os processos de replicação, segregação cromossômica e transcrição. As quebras de dupla fita tem um papel importante na morte celular, havendo uma correlação direta entre o número de lesões de dupla fita e a sobrevivência celular. Diferentemente da maioria dos outros tipos de lesão, nesse caso não é possível o uso da fita complementar como molde para o reparo da lesão (Figura 2).

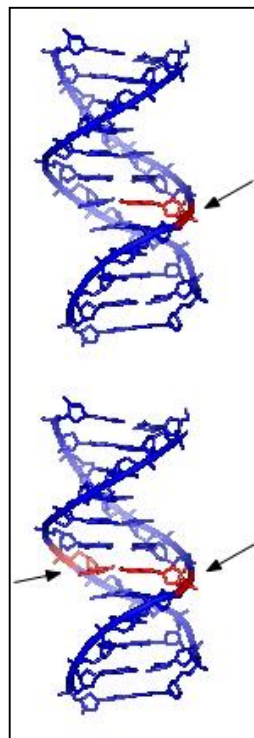


Figura 2. Representação esquemática: quebra de fita simples e quebra de fita dupla.
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ssvsds.jpg>

3.1.1.3. Reparo dos danos ao DNA

Uma única lesão não reparada em determinadas sequências do DNA, como aquelas relacionadas ao controle da divisão celular, pode ter consequências catastróficas para a célula ou mesmo para o indivíduo. A presença de danos no DNA induz diversas respostas celulares, sendo o reparo do DNA, um processo pelo qual as células identificam e corrigem os danos no DNA, uma dessas respostas.

Quando as lesões no DNA estão em apenas uma das fitas da dupla hélice, o reparo se dá com base na complementariedade entre as cadeias que compõe a dupla hélice de DNA. Nos chamados “reparo por excisão”, nucleotídeos perdidos ou modificados são reconhecidos por um sistema de sensores moleculares, que induz a ação de enzimas específicas, responsáveis pela remoção desses(s) nucleotídeo(s) e por sua substituição pelo(s) nucleotídeo(s) adequado(s), de acordo com complementariedade com a outra cadeia de DNA, intacta. Esse reparo inclui o “reparo por excisão de bases” (BER: *base excision repair*, em inglês) e o “reparo por excisão de nucleotídeos” (NER: *nucleotide excision repair*, em inglês), que reparam os danos retirando, respectivamente, um único nucleotídeo ou blocos de nucleotídeos danificados. O NER é importante principalmente para o reparo de lesões que provocam distorções na dupla hélice, como os causados por radiação ultravioleta (HALL & GIACCIA, 2006).

O reparo de fita dupla não pode ser feito com base na complementariedade entre as cadeias do DNA, pois a fita complementar também está ausente ou danificada. Existem duas vias principais para o reparo de quebras duplas: reparo por união de extremidades não-homólogas (NHEJ: *non-nomologous end-joining repair*) e reparo por recombinação homóloga (HR: *homologous recombination*). O reparo do tipo NHEJ pode ocorrer em qualquer fase do ciclo celular, e atua fazendo a união de extremidades de DNA não homólogas livres (aproxima e liga duas pontas soltas de DNA). Esse reparo é sujeito a erros, estando frequentemente associado com a perda de parte do material genético. O outro mecanismo de reparo de quebras duplas no DNA, a recombinação homóloga, requer a presença de uma sequência idêntica ou quase idêntica de DNA para ser usada como molde para o reparo do dano e assim esse tipo de reparo só ocorre quando o DNA está duplicado, havendo uma cromátide irmã não danificada disponível para servir como molde para o reparo (fases S tardia e G2 do ciclo celular, antes da divisão celular). Assim, de modo geral, o reparo é mais eficaz nas fases S tardia e G2 do ciclo celular, quando esse mecanismo está atuante (HALL & GIACCIA, 2006).

O reparo também é geralmente mais eficaz quando a quantidade de lesões no DNA não é muito grande. Assim, de modo geral, para radiações de baixo LET (raios X e gama), o reparo é mais eficiente quando a mesma dose de radiação é depositada de forma fracionada (baixa taxa de dose).

3.1.2. Efeitos celulares

Falhas nos processos de reparo de lesões no DNA podem ter diversas consequências para as células, entre as quais atraso ou interrupção na divisão celular, morte celular ou mutações e transformação celular.

3.1.2.1. Atraso ou parada do ciclo celular

O ciclo celular é um conjunto de processos que ocorrem numa célula entre duas divisões celulares, podendo ser divididos em duas fases principais: interfase (I) e divisão celular ou mitose (M), como representado na figura 3. Na interfase a célula executa suas funções regulares e se prepara para a divisão, crescendo e duplicando seus componentes, inclusive o DNA, que será posteriormente dividido entre duas células filhas durante a divisão celular. A interfase pode ser dividida nas fases G1 (intervalo 1), anterior a duplicação do DNA, quando ocorre a síntese de diversas proteínas e de RNA (ácido ribonucleico); S (síntese), quando o DNA é duplicado, e G2 (intervalo 2), quando ocorre a síntese de diversas macromoléculas, antes da divisão celular (HALL & GIACCIA, 2006).

Em alguns tipos celulares, como os neurônios e células musculares, a divisão celular não existe ou é muito rara, e as células ficam permanentemente no chamado estágio G0, ou senescência (HALL & GIACCIA, 2006).

O ciclo celular é controlado por complexos sistemas celulares. Antes de haver a passagem de uma subfase para a seguinte, esses sistemas avaliam se os eventos que deveriam acontecer na fase anterior ocorreram corretamente, de forma a evitar a geração de células filhas com erros. Quando danos no DNA são detectados a passagem de G1 para S ou de G2 para a divisão celular pode ser interrompida, temporária ou definitivamente. A célula também não termina M caso os cromossomos apresentem danos que impeçam seu correto alinhamento para a divisão celular. O ciclo celular pode ser retomado após o reparo do DNA, com a célula retornando a sua fisiologia normal. Alternativamente, o ciclo celular pode ser definitivamente interrompido, e nesse caso, as funções celulares podem ocorrer de forma parcial ou completa, embora a célula não possa se dividir. Essa perda da

capacidade de divisão celular, em células que normalmente fariam o ciclo celular, é chamada de morte celular reprodutiva (HALL & GIACCIA, 2006).

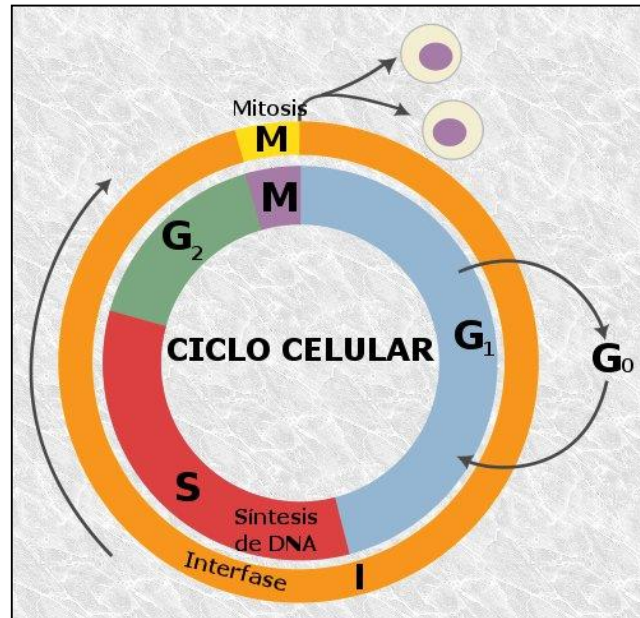


Figura 3. Representação esquemática do ciclo celular.

Fonte: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cell_Cycle-es.jpg

3.1.2.2. Morte celular

Basicamente, a morte celular induzida pela radiação ionizante divide-se em dois tipos, que diferem quanto a sua morfologia, mecanismos, e papéis que desempenham nas doenças e fisiologia: a necrose e apoptose (HALL & GIACCIA, 2006; ICRP, 2007).

A necrose pode ocorrer quando a células sofrem danos graves após a exposição à radiação ionizante, mas também em razão de agentes tóxicos ou de algum trauma, calor intenso, falta de oxigênio, ou quando a célula é infectada por bactérias ou vírus. Esse tipo de morte celular é caracterizado pelo aumento do volume celular, dilatação das organelas, ruptura da membrana plasmática e perda do conteúdo celular.

A presença de danos no DNA pode à indução de apoptose (morte celular programada), caracterizada pela redução do volume celular, condensação da cromatina, fragmentação nuclear e manutenção da integridade da membrana até os estágios finais do processo. A apoptose é um mecanismo de morte celular iniciado pela própria célula, podendo ser visto como um "recurso" que previne a manutenção e transmissão de

informação genética alterada, potencialmente carcinogênica, ameaçando o organismo. A apoptose também ocorre quando os tecidos necessitam ser remodelados durante a morfogênese apoptose (HALL & GIACCIA, 2006).

3.1.2.3. Mutação e transformação celular

Danos ao DNA não reparados ou reparados incorretamente podem resultar em mutações, isto é, alterações estáveis na sequência de bases do DNA, presentes nas duas fitas. As mutações são transmitidas para as células filhas e podem resultar em alterações nas proteínas e assim, em danos estruturais ou funcionais nas células afetadas.

Determinadas mutações levam a alterações na expressão ou função de genes-chave para a manutenção da homeostasia celular. Essas alterações podem converter uma célula normal em uma célula transformada, que se caracteriza por não mais responder aos sinais de controle de proliferação, morte e diferenciação celular. Células transformadas podem evoluir para células cancerosas, mas para isso ela precisa passar por mutações sucessivas e específicas, que não sejam letais e que as dotem de características especiais, como divisão celular acelerada e contínua e apoptose inibida, entre outros (ICRP, 2007, INCA [nd.]).

3.1.3. Efeitos sistêmicos

Os efeitos biológicos das radiações podem ser classificados em determinísticos ou estocásticos, quando são causados respectivamente pela morte celular ou transformação celular.

3.1.3.1. Efeitos determinísticos

Na maioria dos órgãos e tecidos do corpo há um processo contínuo de perda e substituição de células. A exposição à radiação ionizante pode aumentar a destruição celular, mas esta pode ser compensada pela reposição ou reparo celular, sem trazer maiores consequências para o organismo. Quando a exposição à radiação ionizante resulta na redução de um número de células que impede a função normal de um órgão ou tecido podem surgir os chamados efeitos determinísticos (TAUHATA *et al.*, 2014; ICRP, 2007).

Os efeitos determinísticos são caracterizados por um limiar de dose isto é, eles só ocorrem acima de um determinado valor de dose. Acima desse limiar de dose, os efeitos determinísticos são mais frequentes e mais graves quanto maior a dose (e a taxa de dose).

Os órgãos e tecidos mais propensos a apresentar efeitos determinísticos são aqueles com alta taxa de renovação celular, como pele e tecido sanguíneo. São exemplos de efeitos determinísticos na saúde inflamação e ulceração da pele (figura 4), queda de cabelos, leucopenia e anemia, hemorragias, náuseas e vômitos, anorexia, catarata, etc. (TAUHATA *et al.*, 2014; ICRP, 2007).



Figura 4. Dano severo na pele devido a uma exposição prolongada de fluoroscopia.
Fonte: <http://www.scielo.br/pdf/rbci/v22n1/0104-1843-rbci-22-01-0087.pdf>

Os efeitos determinísticos geralmente acontecem em um curto espaço de tempo (dias, horas ou minutos), mas alguns deles se apresentam como efeitos somáticos tardios em pessoas irradiadas com doses de radiação baixas, mas crônicas, ou em pessoas que receberam altas doses de radiação não letal, que podem sentir os efeitos muitos anos mais tarde. Alguns desses efeitos podem ser lesões degenerativas, como anemia e catarata (TAUHATA *et al.*, 2014; ICRP, 2007).

A síndrome aguda da radiação é um efeito determinístico que ocorre após a exposição de corpo inteiro, com altas doses de radiação, em um pequeno intervalo de tempo. Os sintomas dependem da dose recebida e variam ao longo do tempo, sendo geralmente classificados como síndrome hematopoiética, síndrome gastrointestinal e síndrome do sistema nervoso central.

3.1.3.2. Efeitos estocásticos

Os efeitos estocásticos incluem câncer e efeitos hereditários. Eles ocorrem quando o dano provocado pela radiação ionizante no DNA de uma célula gera uma célula com DNA alterado e que mantém preservada sua capacidade de reprodução. Há uma probabilidade de que esta célula desenvolva uma condição neoplástica (câncer) ou, quando as células alteradas são da linhagem germinativa, que as modificações genéticas sejam transmitidas para os descendentes e resultem em efeitos hereditários.

Não existe limiar de dose para efeitos estocásticos e qualquer dose, mesmo pequena, pode resultar em um efeito estocástico. A probabilidade de ocorrência de efeito estocástico aumenta proporcionalmente com a dose, mas não há relação entre a dose e a gravidade do efeito. É o tipo e a localização do tumor ou a anomalia resultante que determina a severidade do efeito (TAUHATA *et al.*, 2014; HALL & GIACCIA, 2006; ICRP, 2007).

3.1.3.2.1. Efeitos hereditários

Os efeitos hereditários podem ocorrer quando as células germinativas (do ovário ou dos testículos) sofrem alteração na informação genética em decorrência da exposição à radiação ionizante. Se um óvulo ou um espermatozóide com DNA modificado for usado na concepção, a alteração será repassada ao óvulo fertilizado e todas as células do embrião/feto conterão informação genética modificada. Quando a criança amadurece e se reproduz, a transferência dessa informação genética alterada será inevitável, podendo continuar a ser transmitida por muitas gerações. Algumas dessas mutações, de forma isolada ou combinadas com outras mutações, poderão resultar em doenças nos seus portadores (TAUHATA *et al.*, 2014; HALL & GIACCIA, 2006; ICRP, 2007).

Os resultados dos estudos entre os sobreviventes de Hiroshima e Nagasaki não mostram evidências de que a exposição à radiação ionizante causou aumento de doenças hereditárias nos descendentes dos indivíduos expostos, mas dados de experimentos com animais sugerem ser prudente continuar a considerar esses riscos (TAUHATA *et al.*, 2014; HALL & GIACCIA, 2006; ICRP, 2007).

3.1.3.2.2. Câncer

Câncer é a denominação genérica de uma série de doenças caracterizadas pela divisão descontrolada de células, que adquirem a habilidade de invadir outros tecidos, entre outras características (figura 5). Uma única alteração em uma base do DNA ou a perda de pequenas regiões ou de fragmentos cromossômicos pode levar a alteração de genes envolvidos no controle da divisão celular, causando uma proliferação celular descontrolada, que pode evoluir para um câncer. Embora a introdução de mutações no genoma de uma célula seja considerada indispensável para a indução de um câncer, outros fatores estão envolvidos no processo de cancerização, estimulando-o ou o inibindo (INCA [nd.]).

As principais etapas da oncogênese são: iniciação, promoção, conversão e progressão. A iniciação é a fase onde ocorrem os eventos iniciais no DNA e a produção de uma célula com potencial para se desenvolver em um câncer (estágio pré-neoplásico). A radiação parece agir principalmente nesse estágio, pela introdução de mutações que permitem que a célula tenha um crescimento anormal. Os outros estágios da oncogênese também se caracterizam pelo surgimento de mutações e têm durações variáveis. Assim, o período entre o momento em que ocorrem mutações no genoma de uma célula e a eventual manifestação do câncer no indivíduo pode ser de vários anos (período de latência).

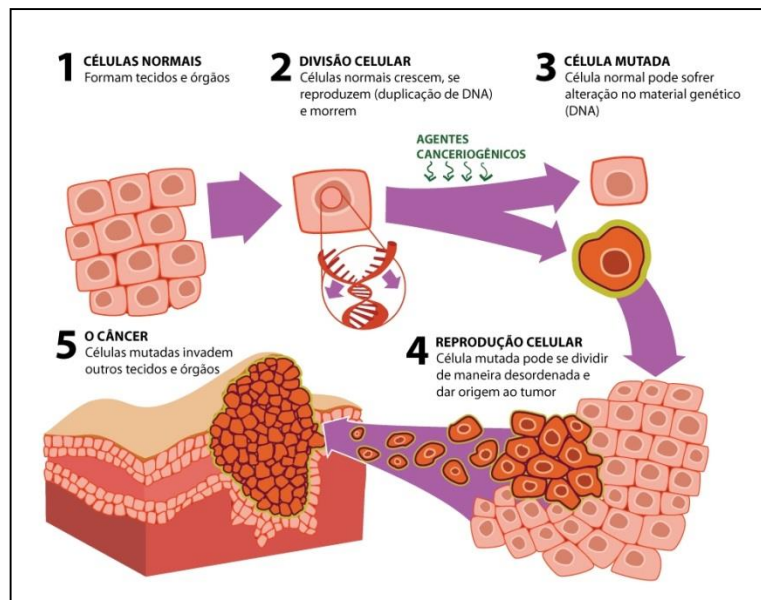


Figura 5. Representação esquemática do desenvolvimento do câncer.

Fonte: <http://2.bp.blogspot.com/-dXta7fFuESc/Ua9DuIBkiaI/AAAAAAAAAKA/4REx6mWtDIM/s1600/veja18-cancer.JPG>

dXta7fFuESc/Ua9DuIBkiaI/AAAAAAAAAKA/4REx6mWtDIM/s1600/veja18-cancer.JPG

A radiação ionizante é um reconhecido agente carcinogênico (IARC, 2012) e de uma perspectiva de saúde pública, o câncer é o efeito mais importante causado pela radiação ionizante na saúde (HALL & GIACCIA, 2006).

A radiação ionizante pode induzir o câncer ao causar danos no DNA, principalmente quando esses ocorrem em genes que regulam os processos de divisão celular, como as mutações em proto-oncogenes e em genes supressores de tumores. Proto-oncogenes são genes que promovem o crescimento celular e a mitose, podendo codificar hormônios, estar envolvidos na transdução de sinais, etc. Por outro lado, genes supressores de tumor desestimulam o crescimento celular, sendo geralmente fatores de transcrição ativados por danos ao DNA ou stress celular (ICRP, 2007).

O câncer radio-induzido é um efeito estocástico da radiação ionizante, e assim não há limiar de dose, ou seja, qualquer dose de radiação, mesmo baixa, está associada a uma probabilidade de indução de câncer. Essa probabilidade aumenta com a dose, mas o que determina a severidade do efeito é o tipo do tumor resultante, não havendo relação entre dose de radiação e a gravidade do efeito (TAUHATA *et al.*, 2014; ICRP, 2007).

3.2. EVIDÊNCIAS DA INDUÇÃO DE CÂNCER PELA RADIAÇÃO

3.2.1. Histórico

Os efeitos deletérios da radiação ionizante foram relatados já no início do século XX, logo após a descoberta dos raios X e da radioatividade. Alguns dos pacientes, médicos e pesquisadores pioneiros relataram irritação nos olhos, perda de cabelo, vermelhidão na pele, queimaduras e outras lesões. Em 1902 foi publicado o primeiro relato associando a exposição às radiações à indução de câncer e, em 1911, apareceram relatos de leucemia em indivíduos ocupacionalmente expostos aos raios X (WALKER, 1989).

Nessa mesma época, além do uso intensivo dos raios x e da radioatividade em diagnóstico e terapia, as radiações passaram ser usadas também com outras finalidades. Por exemplo, raios X eram usados para depilação para fins cosméticos e para a confecção de sapatos por encomenda e materiais radioativos como o rádio eram adicionados a cremes embelezadores, à água de beber, e mesmo em produtos médico-farmacêuticos usados no combate à insônia, artrite, asma e bronquite. Nas décadas de 1910 e 1920, com a expansão

de seu uso, surgiram os primeiros relatos de câncer em consequência da ingestão de rádio (WALKER, 1989).

Um caso que ficou muito conhecido foi o das jovens que pintavam mostradores de relógio usando uma tinta à base de rádio e fósforo, para fazê-los fluorescentes. Elas tinham o hábito de levar o pincel à boca, para afiná-lo, o que resultava na ingestão do material radioativo, com a consequente contaminação interna. Em cerca de dois anos, ao menos nove dessas trabalhadoras morreram de uma anemia severa, acompanhada de graves lesões na boca, enquanto muitas outras morreram posteriormente, em consequência de câncer ou de outros efeitos letais (HALL & GIACCIA, 2006). Como mostrado na figura 6, os casos de câncer apareceram principalmente nas mulheres que ingeriram maior quantidade de rádio.

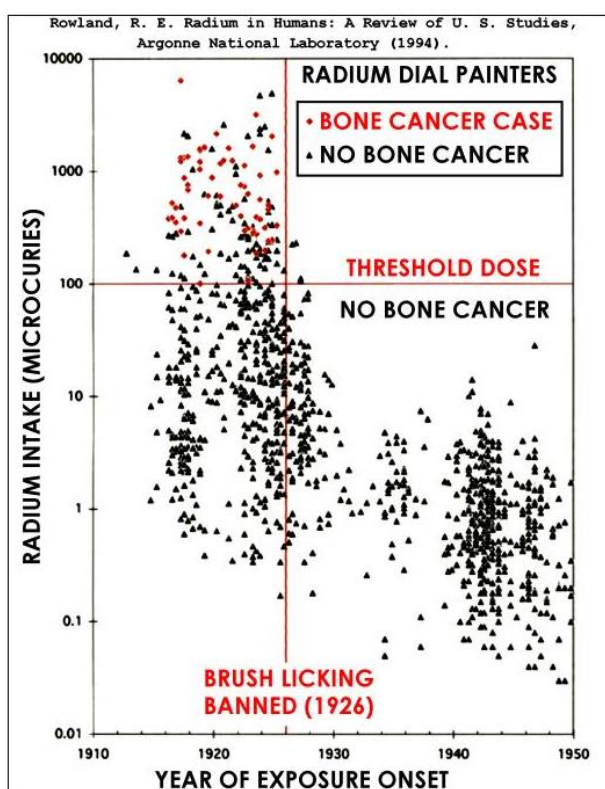


Figura 6. Câncer nas pintoras de mostradores de relógio com tinta radioativa.
Fonte: http://www.rerowland.com/dial_painters.htm

3.2.2. Estudo dos sobreviventes de Hiroshima e Nagasaki

Os estudos sobre a indução do câncer pela radiação ganharam grande importância após as explosões das bombas nucleares em Hiroshima e Nagasaki, em 1945, durante a Segunda Guerra Mundial (HALL & GIACCIA, 2006).

O “Life Span Study” (LSS) é uma extensa avaliação sobre os efeitos da radiação na saúde dos sobreviventes das explosões atômicas. Esse estudo é a principal fonte de dados sobre os efeitos carcinogênicos da exposição humana à radiação ionizante e demonstrou um aumento na incidência de leucemia e de tumores sólidos nos indivíduos expostos à radiação, de forma dose dependente. Para tumores sólidos como um todo há uma relação dose-resposta linear para indução do câncer pela radiação na faixa entre 0 a 2 Gy, sendo essa relação estatisticamente significativa mesmo quando a análise é limitada a indivíduos que foram expostos a doses menores que 0,15 Gy (figura 7).

O LSS também mostrou a existência de um período de latência variável entre a exposição e o diagnóstico de câncer. A incidência de leucemia começa a aumentar dois anos após a exposição, enquanto a incidência de tumores sólidos começa a aumentar posteriormente, cerca de 5 anos após a exposição (PRESTON *et al.*, 2007).

Os estudos também mostram que, de modo geral, o risco de câncer após exposição à radiação varia conforme o gênero, sendo as mulheres ligeiramente mais sensíveis do que os homens e ainda, que há uma associação inversa entre idade na exposição e risco de indução de câncer (PRESTON *et al.*, 2007).

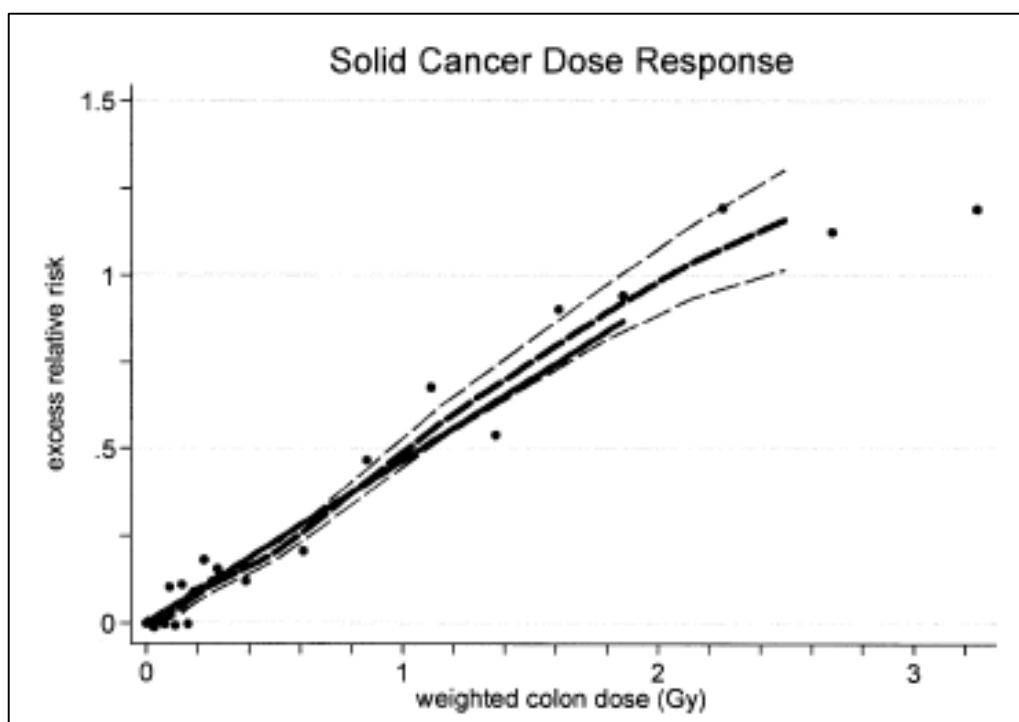


Figura 7. Função dose-resposta da indução de tumores sólidos nos indivíduos expostos à radiação ionizante nas explosões atômicas de Hiroshima e Nagasaki, em 1945.

Fonte: PRESTON *et al.*, 2007.

O LSS demonstrou ainda que a incidência de câncer variava de acordo com a idade do indivíduo na época da exposição. Para tumores sólidos como um todo e alguns tumores em particular, como o câncer de tireoide, o risco é maior quanto menor a idade do indivíduo na exposição (figura 8). Isso é explicado pela maior radiosensibilidade intrínseca dos tecidos e órgãos de crianças e adolescentes, que estão em desenvolvimento, apresentando maiores taxas de divisão celular, assim como a sua maior expectativa de vida, possibilitando o aparecimento de efeitos tardios, após um longo período de latência (PRESTON *et al.*, 2007).

Age-at-Exposure Category Specific ERR Estimates ^a for All Solid Cancers and Selected Sites				
Site	Age-at-exposure group			
	0-9	10-19	20-39	40+
All solid	0.72 (0.52; 0.98)	0.64 (0.51; 0.79)	0.41 (0.33; 0.50)	0.41 (0.29; 0.53)
Stomach	0.63 (0.23; 1.4)	0.38 (0.19; 0.68)	0.38 (0.22; 0.56)	0.23 (0.06; 0.42)
Colon	0.45 (0.13; 1.3)	0.54 (0.25; 1.0)	0.54 (0.23; 0.92)	0.51 (-0.06; 1.3)
Liver	0.06 (<-0.1; 0.63)	0.61 (0.18; 1.3)	0.18 (<-0.07; 0.44)	0.44 (<-0.14; 1.1)
Lung	0.66 (<-0.02; 2.0)	0.57 (0.23; 1.1)	0.79 (0.48; 1.2)	1.2 (0.71; 1.7)
Breast	0.78 (0.38; 1.5)	1.2 (0.69; 1.9)	0.83 (0.48; 1.3)	0.54 (-0.02; 1.4)
Bladder	-0.09 (<-0.1; 5.1)	1.3 (0.16; 3.9)	1.1 (0.33; 2.2)	1.4 (0.47; 2.8)
Thyroid	1.5 (0.47; 3.9)	1.2 (0.50; 2.5)	0.46 (0.11; 1.1)	0.31 (-0.1; 0.92)

^a Gender-averaged ERR estimates at 1 Gy in age-at-exposure categories. These estimates were computed without the assumption that the ERR varies as a log-linear function of exposure age (as was done in Table 12). Estimates were standardized to attained age 70 by assuming that the within each age-at-exposure group the ERR varies as a power of attained age.

Figura 8. Estimativas de risco de indução de tumores sólidos (em excesso) nos indivíduos expostos à radiação ionizante nas explosões atômicas de Hiroshima e Nagasaki, em 1945, de acordo com a idade na exposição.

Fonte: PRESTON *et al.*, 2007.

3.2.3. Estudos com crianças submetidas à radioterapia

Há várias evidências mostrando risco aumentado de câncer após exposição à radiação ionizante em crianças e jovens.

Após radioterapia para o tratamento de doenças benignas ou malignas, se observou um risco aumentado de cânceres secundários relacionados à radiação prévia, sendo esses riscos particularmente elevados nos casos de tratamento do câncer infantil. O tratamento radioterápico para doenças benignas era relativamente comum entre os anos de 1940 e 1960. Crianças que foram tratadas com radiação com a finalidade de controlar lesões benignas do couro cabeludo (*tinea capitis*) mostraram incidência aumentada de câncer, principalmente na área irradiada ou próxima a esta. Esse aumento é dose dependente e decresce com o aumento da idade na época da irradiação (RON *et al.*, 1988; SADETZKI *et al.*, 2005).

Há também muitas informações provenientes do estudo de indivíduos irradiados para o tratamento de tumores malignos. Por exemplo, após a irradiação da região do pescoço na infância para o tratamento de alguns tipos de câncer, como linfoma de Hodgkin e neuroblastoma, observa-se um posterior aumento de câncer de tireoide. Uma análise combinada de vários estudos sobre os riscos de indução de câncer de tireoide após exposição à radiação externa na infância evidenciou uma relação dose-resposta linear, mesmo para baixas doses. O risco decresce rapidamente com o avanço da idade, sendo significativo para indivíduos expostos antes dos 15 anos de idade, mas não para aqueles expostos em idades mais avançadas (RON *et al.*, 1995).

Outro estudo, com mais de 14.000 indivíduos que sobreviveram por 5 ou mais anos após o diagnóstico de câncer na infância ou adolescência (*Childhood Cancer Survivors Study*) evidenciou que o risco de desenvolvimento de câncer de tireoide após radioterapia da cabeça, pescoço ou tórax na infância aumenta após exposição a doses baixas a moderadas de radiação, diminuindo após doses mais altas (em torno de 20-30 Gy) possivelmente devido a ocorrência de morte celular nesta faixa de dose. Os pacientes que foram submetidos à radioterapia antes dos 10 anos apresentam maior risco de desenvolver câncer de tireoide do que aqueles tratados idades mais avançadas, como mostrado na figura 9 (SIGURDSON *et al.*, 2005; BHATTI *et al.*, 2010).

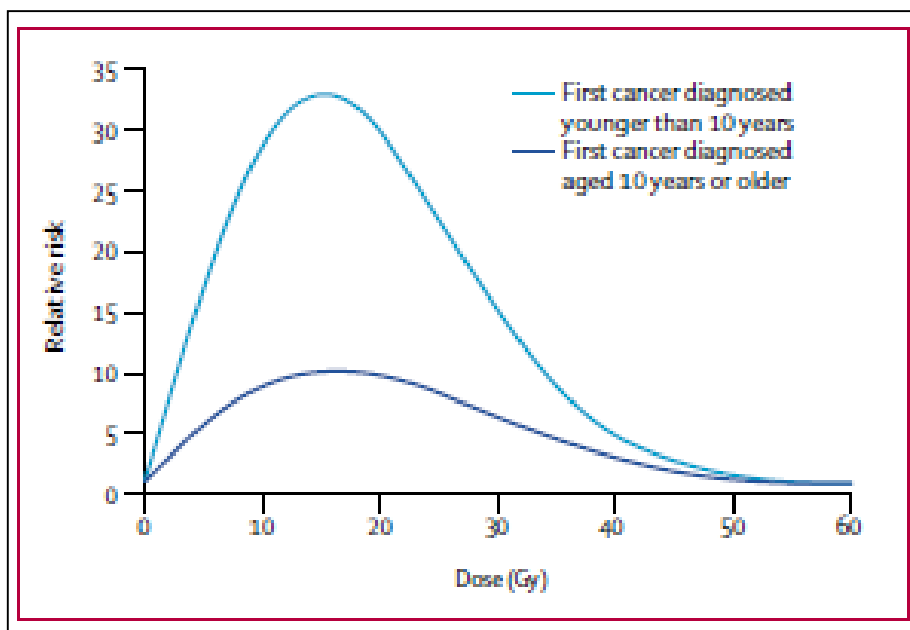


Figura 9. Risco relativo de câncer de tireoide após radioterapia na infância.
Fonte: SIGURDSON *et al.*, 2005.

3.2.4. Estudos com sobreviventes do acidente nuclear de Chernobyl

O número de casos de câncer pediátrico de tireoide aumentou na Ucrânia e na Bielorrússia poucos anos após o acidente de Chernobyl, em 1986. Esse aumento parece estar relacionado à exposição interna ao I^{131} , o principal componente do *fallout* resultante do acidente, e que é rapidamente absorvido pela tireoide. Assim como ocorre após exposição externa, a forma da curva dose-resposta é basicamente linear, com indicação de queda após doses mais altas, o aumento da incidência é maior nos grupos que eram mais jovens na época da exposição, não sendo observados aumentos significativos após a exposição de adultos, e o número de casos continua aumentando, mais de 25 anos após o acidente (WILLIAMS, 2008).

3.2.5. Estudos após a exposição a baixas doses de radiação

A maioria dos estudos sobre a indução do câncer pela radiação é feita após exposições a altas doses. Evidências epidemiológicas diretas de indução de câncer após exposição a baixas doses são de difícil obtenção, devidos aos problemas metodológicos relativos ao baixo risco associado. Assim, a detecção de um número estatisticamente significativo de casos de câncer em excesso necessita do seguimento de uma população muito numerosa, por um longo período de tempo, o que é agravado pela elevada incidência basal de câncer na maioria das populações.

Diversos trabalhos sugerem um risco aumentado de câncer após exposições ocupacionais (CARDIS *et al.*, 2005, 2007; MUIRHEAD *et al.*, 2009) e em indivíduos que vivem em áreas de radiação elevada (SCHONFELD *et al.*, 2013; BAUER *et al.*, 2005; KENDALL *et al.*, 2013), mas de modo geral, nesses estudos as incertezas associadas são muito altas, mesmo quando os riscos são estatisticamente significativos.

3.2.6. Estudos após a exposição a raios X com finalidade diagnóstica

Alguns estudos também sugerem risco aumentado de câncer após exposições médicas para fins diagnósticos. O “*Oxford Survey of Childhood Cancers*” (OSCC) mostrou risco aumentado de câncer pediátrico na prole de mulheres irradiadas para fins diagnósticos durante a gestação, procedimento comum nos anos 50 (MOLE, 1990; DOLL & WAKEFORD, 1997).

Um risco elevado de câncer de mama foi relatado entre mulheres com tuberculose que se submeteram a múltiplas fluoroscopias torácicas, assim como em pacientes com escoliose que realizaram diversos exames radiográficos durante a infância e adolescência (LINET *et al.*, 2012). Entretanto, esses estudos têm poder estatístico limitado, com intervalos de confiança muito grandes e muitas incertezas relacionadas a determinação das doses, além de fatores de confundimento.

Modelos epidemiológicos de projeção de risco, baseados nas informações disponíveis sobre os riscos de câncer após exposição à radiação, permitem uma avaliação da magnitude dos riscos potenciais após exposições a baixas doses e têm sido usados para estimar o risco de indução de câncer após a exposição à radiação para fins de diagnóstico. Usando esses modelos e dados sobre o uso de CT no início dos anos 90 no Reino Unido, estimou-se que aproximadamente 0,2% dos casos incidentes de câncer em geral poderiam ser atribuídos a varreduras tomográficas (BERRINGTON DE GONZÁLEZ & DARBY, 2004). Outros autores, considerando que nessa época o uso de tomografia computadorizada nos Estados Unidos era 10 vezes maior que no Reino Unido, sugeriram que 1,5 a 2,0% dos casos incidentes de câncer nos Estados Unidos poderiam ser atribuídos ao uso desses procedimentos (BRENNER & HALL, 2007). Projeções de risco atualizadas recentemente, usando novas estimativas detalhadas da frequência de exposições diagnósticas nos Estados Unidos (NCRP, 2009) e modelos atualizados de projeção de risco para a população americana (NRC, 2006), sugerem que os cerca de 70 milhões de tomografias computadorizadas realizadas nos EUA em 2007 podem resultar em cerca de 29.000 casos futuros de câncer, representando aproximadamente 2% dos casos diagnosticados anualmente nos Estados Unidos (BERRINGTON DE GONZÁLEZ *et al.*, 2009).

3.2.7. Estudo após exposição à tomografia computadorizada na infância

Dois trabalhos recentes obtiveram evidência epidemiológica direta da associação entre a realização de tomografias computadorizadas na infância o risco subsequente de câncer. Pearce e colaboradores (PEARCE *et al.*, 2012) avaliaram quase 180.000 pacientes menores de 22 anos submetidos à tomografia computadorizada no Reino Unido entre 1985 e 2002, verificando posteriormente o aparecimento de leucemia ou tumores cerebrais nesses pacientes no registro de câncer nacional. Foi observado que os riscos de câncer de cérebro ou de leucemia são lineares respectivamente com as doses absorvidas no cérebro

ou na medula óssea, calculadas individualmente (figura 10). Foi observado também que os riscos são maiores após a exposição de crianças mais novas.

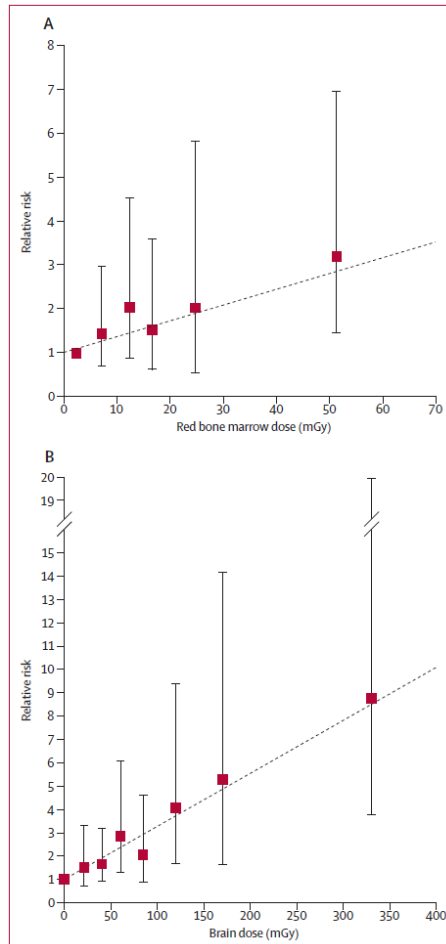


Figura 10. Risco relativo de leucemia e tumores de cérebro em função da dose absorvida na medula óssea e cérebro, respectivamente. (PEARCE *et al.*, 2012)

O trabalho de Mathews e colaboradores (MATHEWS *et al.*, 2013) avaliou 680.000 crianças e jovens até 19 anos submetidas à tomografia computadorizada na Austrália entre 1985 e 2005, relatando uma incidência de câncer 24% maior nos indivíduos expostos que nos não expostos. Esse estudo também mostrou que o risco tem uma relação dose-resposta e que é maior para menor idade na exposição.

Em resumo, esses estudos apresentaram evidência direta do aumento do risco de desenvolvimento de câncer após exposição às baixas doses de radiação associadas ao radiodiagnóstico. Embora o risco individual de desenvolver um câncer seja muito pequeno, quando um grande número de pessoas é exposta, o risco coletivo pode ser significativo.

3.3. EXPOSIÇÕES MÉDICAS PARA FINS DE DIAGNÓSTICO

O uso da radiação ionizante em medicina se iniciou com a descoberta dos raios X, em 1895. Desde então, novas aplicações diagnósticas e terapêuticas foram desenvolvidas, aumentando significativamente a exposição da população mundial à radiação.

O Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica (UNSCEAR) estimou que, no período de 1997-2007, foram realizados anualmente mais de 3,6 bilhões de procedimentos utilizando radiação ionizante para fins diagnósticos, incluindo radiografias médicas e odontológicas, fluoroscopias, varreduras por CT e estudos por medicina nuclear. Esse número representa o dobro do número de exames realizados em 1980-1984, e mais de 10 vezes o estimado para 1950 (UNSCEAR, 2008; METTLER *et al.*, 2009). A maior parte dos exames é de radiodiagnóstico médico (78%) e odontológico (21%), com exames de medicina nuclear representando uma pequena fração dos procedimentos (1%).

A dose efetiva média anual global *per capita* proveniente do uso da radiação ionizante para fins diagnósticos também quase duplicou entre 1980-1984 e 1997-2007, subindo de cerca 0,35 mSv para 0,62 mSv, o que representa 20% da dose efetiva média anual global *per capita*, que é 3,0 mSv (METTLER *et al.*, 2009; UNSCEAR, 2008).

Nos Estados Unidos, em 2006, foram realizados cerca de 400 milhões de procedimentos radiodiagnósticos, que resultaram numa dose efetiva média *per capita* de 3,0 mSv, representando mais de 50% da dose efetiva média anual *per capita* americana, estimada em 5,6 mSv. Assim, houve um aumento de cerca de 6 vezes em relação a 1980, quando a dose resultante de procedimentos que utilizam radiação para fins diagnósticos era 0,53 mSv e representava 15% da dose média *per capita*, 3,0 mSv, como apresentado na figura 11 (METTLER *et al.*, 2009; NCRP, 2009).

3.3.1. Tomografia Computadorizada

Apesar das doses em procedimentos radiológicos variarem muito de acordo com o tipo de exame e as características do equipamento e do paciente, exames de tomografia computadorizada geralmente produzem doses bem mais elevadas do que aquelas de exames radiodiagnósticos convencionais. Por exemplo, enquanto um exame radiológico típico de tórax em adultos (projeções pósterio-anterior e lateral) resulta em uma dose efetiva média de cerca de 0,1 mSv (com variação entre 0,05 e 0,24 mSv), uma varredura

dessa região por tomografia computadorizada varia entre 4,0 e 18,0 mSv, com dose efetiva média de 7 mSv. As doses absorvidas nos órgãos que estão no feixe primário podem variar entre 10 e 100 mGy, ficando normalmente na faixa de 15 a 30 mGy (METTLER *et al.*, 2008).

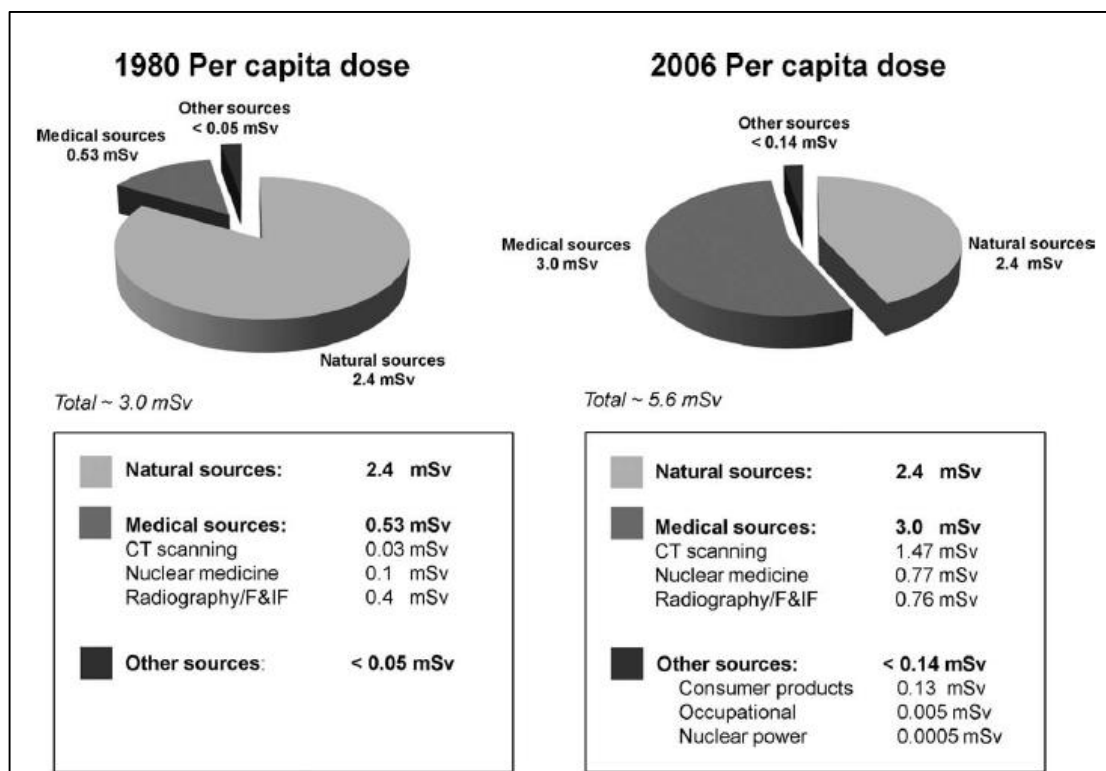


Figura 11. Crescimento do uso da radiação em medicina nos Estados Unidos (1980-2006).
Fonte: LINET *et al.*, 2012

A tomografia computadorizada foi introduzida em 1972 e é conhecida pelo alto poder de diagnóstico. Essa técnica tem apresentado grande evolução tecnológica e a frequência de varreduras por tomografia computadorizada na população mundial tem crescido intensamente, tendo aumentado de 1-3 exames por 1.000 habitantes em 1977-1980 para 35 exames por 1.000 habitantes em 1997-2007. A dose efetiva média anual global *per capita* proveniente desses procedimentos aumentou cerca de 5 vezes entre 1985-1990 e 1997-2007, indo de 0,05 mSv para 0,24 mSv, que representa cerca de 40% da dose efetiva média *per capita* decorrente de exames de radiodiagnóstico. Assim, atualmente a tomografia computadorizada representa cerca de 7% dos procedimentos radiológicos de diagnóstico, mas aproximadamente 40% da dose efetiva coletiva mundial (METTLER *et al.*, 2009; UNSCEAR, 2008).

Nos Estados Unidos, nos últimos 15 anos, o número de varreduras por tomografia computadorizada passou de aproximadamente 3,3 milhões de exames, entre 1980 e 1982, para 67 milhões de exames em 2006, atingindo a taxa de 223 exames/1.000 habitantes/ano. Vale ressaltar que isso representa um aumento de mais de 10% ao ano, enquanto no mesmo período a população americana cresceu menos de 1% ao ano. A dose efetiva *per capita* em 2006, em decorrência desses exames foi estimada em 1,47 mSv, um aumento de quase 50 vezes em relação ao período de 1980-1982, quando esta foi 0,03 mSv (figura 11). De fato, quase todo o incremento da dose efetiva média *per capita* entre 1980-1982 e 2006 é decorrente do aumento da dose proveniente de tomografia computadorizada, que representa atualmente metade da dose efetiva média *per capita* resultante de aplicações da radiação em diagnóstico (METTLER *et al.*, 2009; NCRP, 2009).

3.3.2. Tomografia computadorizada na infância e adolescência

A disponibilidade crescente de equipamentos e o desenvolvimento de tomógrafos helicoidais e de múltiplos detectores, que permitem a realização de varreduras tomográficas em frações de segundos, facilitando a execução dos exames sem necessidade de anestesia, têm contribuído para o aumento do uso da tomografia computadorizada em pediatria. No mundo, é estimado que 7 a 10% das tomografias computadorizadas sejam realizadas em crianças de até 15 anos, sendo os exames mais comuns as varreduras de crânio, seguidas pelas varreduras de abdômen/pélvis (BERRINGTON DE GONZÁLEZ *et al.*, 2009).

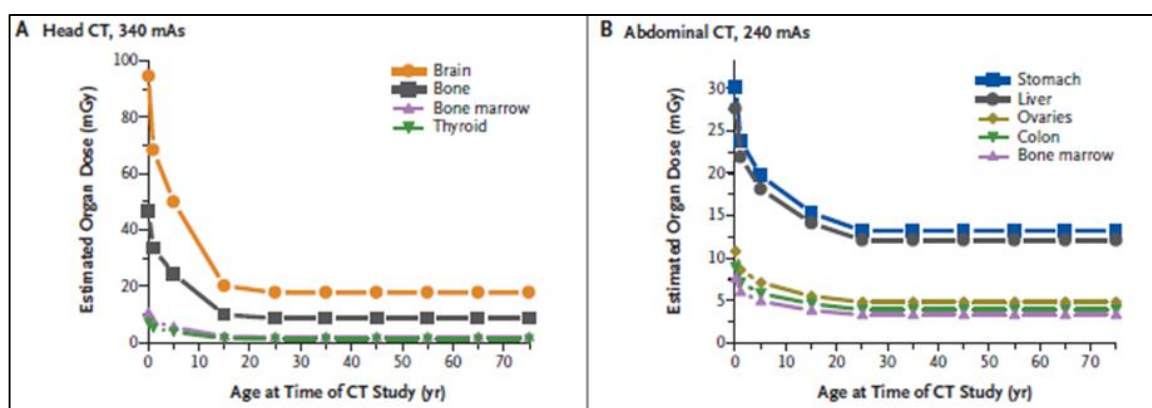


Figura 12. Variação das doses absorvidas em diferentes órgãos em exames de tomografia computadorizada de crânio ou de abdômen, de acordo com a idade do paciente.

(Fonte: BRENNER & HALL, 2007)

A dose absorvida em um órgão depende de vários fatores, relacionados principalmente ao equipamento, ao protocolo do exame e às características do paciente. Como frequentemente os exames tomográficos não são adaptados ao paciente, para um determinado protocolo as doses absorvidas são geralmente maiores em crianças menores, em parte devido à menor atenuação da radiação em indivíduos de menor massa corporal, como mostrado na figura 12 (BERRINGTON DE GONZÁLEZ *et al.*, 2009).

Assim, o risco de desenvolvimento de câncer em consequência de exames de tomografia computadorizada na infância, mesmo sendo baixo, parece ser crescente, considerando o grande crescimento dos exames de tomografia computadorizada, em especial, em crianças e jovens. Esse risco, quando aplicado a um grande número de indivíduos, pode ter profundas implicações em termos de saúde pública, justificando assim a importância da proteção radiológica nessa prática (BERRINGTON DE GONZÁLEZ *et al.*, 2009).

3.4. PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

A radiação ionizante trouxe grandes benefícios para a sociedade, entretanto seu uso pode causar efeitos danosos ao homem e demais seres vivos. O objetivo da proteção radiológica é minimizar os potenciais efeitos danosos associados ao uso das radiações ionizantes sem limitar seus benefícios.

3.4.1. Histórico

A proteção radiológica surgiu quase imediatamente após a descoberta dos raios-X, da radioatividade e de seus potenciais efeitos adversos, no final do século XIX. Essa ciência tem evoluído desde então tendo como base os novos conhecimentos sobre os efeitos biológicos da radiação ionizante e considerando os riscos aceitáveis pela sociedade.

As primeiras recomendações de proteção radiológica sugeriam a diminuição da frequência e do tempo de exposição aos raios X, assim como a ampliação da distância entre o tubo e o usuário, pois era claro que as queimaduras observadas apareciam após exposições frequentes ou intensas.

Ainda no século XIX foram desenvolvidos os primeiros aparatos protetores, como filtros, colimadores e cabeçotes de chumbo para os tubos de raios-X, telas intensificadoras para reduzir o tempo de exposição e equipamentos de proteção individual, como luvas,

aventais e protetores de olhos. Essas medidas também incluíam a sugestão do uso de barreiras protetoras para equipamentos de raios-X e de blindagem e manipulação remota para manipulação de fontes de rádio, e tinham como objetivo a prevenção dos efeitos mais óbvios, como as ulcerações de pele observadas após exposições mais intensas. Entretanto, tinham pouco resultado sobre efeitos observados mais tardiamente e ainda não conhecidos, como a indução de câncer. Além disso, as práticas de proteção radiológica não foram disseminadas rapidamente, e até o final da década de 1930 era comum a observação de unidades de raios X de uso médico operando sem qualquer tipo de proteção (LINDELL *et al.*, 1996).

O número de casos de efeitos adversos da radiação aumentou muito na década de 1910, principalmente devido ao uso massivo de equipamentos de raios-X durante a I Guerra Mundial. Em 1913 foi publicada na Alemanha uma advertência sobre o uso dos raios-X e, em 1915, a “*Sociedade Britânica Roentgen*” reconheceu os efeitos potencialmente danosos dos raios-X e propôs padrões para a proteção de trabalhadores, incluindo aspectos relacionados à blindagem, no que foi provavelmente o primeiro esforço organizado de proteção radiológica. Essa mesma sociedade estabeleceu o “Comitê Britânico de Proteção aos Raios X e ao Rádio”, que publicou suas primeiras recomendações em 1921. Também na década de 1920 surgiram os primeiros monitores individuais para monitoração de rotina, foi adotada a primeira unidade de medição de radiação, o Roentgen, e surgiram os primeiros conceitos de dose de tolerância ou limite de exposição permitido (LINDELL *et al.*, 1996). Em 1928 foi criada o “Comitê Internacional de Proteção aos Raios-X e ao Rádio”, (*International X-ray and Radium Protection Committee*), órgão precursor da atual Comissão Internacional de Proteção Radiológica (*International Commission on Radiological Protection*, ICRP), e que nesse mesmo ano divulgou suas primeiras “Recomendações de Proteção Radiológica”, com foco em indivíduos ocupacionalmente expostos aos raios X e ao rádio (figura 13). Essas recomendações, que incluíam restrições quanto ao tempo de trabalho (não trabalhar mais que sete horas por dia, até cinco dias por semana, respeitando férias anuais de trinta dias) e orientações gerais sobre as salas (tamanho suficiente para os equipamentos, temperaturas em torno de 18°C, exaustão, ventilação e iluminação adequadas, etc.) evitavam apenas, e de forma parcial, os efeitos determinísticos da radiação ionizante. Posteriormente, a ICRP foi reestruturada para poder englobar os usos da radiação fora da área médica e várias outras “Recomendações da ICRP” foram publicadas (LINDELL *et al.*, 1996).

INTERNATIONAL RECOMMENDATIONS FOR X-RAY AND RADIUM PROTECTION

on the proposal of the Radio-Physics Section adopted by the Second International Congress of Radiology in Stockholm, July 27th, 1928

1. The dangers of over-exposure to X-rays and radium can be avoided by the provision of adequate protection and suitable working conditions. It is the duty of those in charge of X-ray and radium departments to ensure such conditions for their personnel. The known effects to be guarded against are:

- (a) Injuries to the superficial tissues;
- (b) Derangements of internal organs and changes in the blood.

I. *Working Hours etc.*

2. The following working hours etc. are recommended for whole-time X-ray and radium workers:

- (a) Not more than seven working hours a day.
- (b) Not more than five working days a week. The off-days to be spent as much as possible out of doors.
- (c) Not less than one month's holiday a year.
- (d) Whole-time workers in hospital X-ray and radium departments should not be called upon for other hospital service.

II. *General X-Ray Recommendations.*

3. X-ray departments should not be situated below ground-floor level.

4. All rooms, including dark-rooms, should be provided with windows affording good natural lighting and ready facilities for admitting sunshine and fresh air whenever possible.

5. All rooms should be provided with adequate exhaust ventilation capable of renewing the air of the room not less than 10 times an hour. Air inlets and outlets should be arranged to afford cross-wise ventilation of the room.

6. All rooms should preferably be decorated in light colours.

7. X-ray rooms should be large enough to permit a convenient lay-out of the equipment. A minimum floor area of 250 sq. feet (25 sq. metres) is recommended for X-ray rooms and 100 sq. feet (10 sq. metres) for dark-rooms. Ceilings should be not less than 11 feet (3.5 metres) high.

8. A working temperature of about 18° C. (65° F.) is desirable in X-ray rooms.

9. Wherever practicable, the X-ray generating apparatus should be placed in a separate room from the X-ray tube.

Figura 13: Recomendações do Comitê Internacional de Proteção aos Raios-X e ao Rádio para indivíduos ocupacionalmente expostos.
Fonte: <http://www.icrp.org/images/1928.JPG>

3.4.2. A ICRP

A ICRP é uma organização não governamental, internacional, sem fins lucrativos, que tem como objetivo fornecer recomendações e orientações sobre proteção radiológica. É composta por mais de duzentos membros voluntários de cerca de 30 países, que representam os principais pesquisadores e formuladores de políticas no campo de proteção radiológica (CLARKE & VALENTIN, 2005). A ICRP trabalha em conjunto com a Comissão Internacional de Unidades e Medidas das Radiações (*International Commission on Radiation Units and Measurements*, ICRU), que define as grandezas e unidades utilizadas em proteção radiológica, e com o Comitê Científico sobre os Efeitos da Radiação Atômica da Organização das Nações Unidas (*United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*, UNSCEAR), que analisa e avalia a literatura sobre os efeitos biológicos das radiações.

O sistema de proteção radiológica desenvolvido pela ICRP é baseado tanto no conhecimento científico sobre as exposições e os efeitos da radiação ionizante como em juízos de valor, que consideram as expectativas da sociedade, a ética e a experiência obtida na aplicação do sistema.

As primeiras “Recomendações da ICRP” eram guias gerais, relacionados principalmente ao tempo de exposição. Em 1934 surgiram as primeiras recomendações incluindo uma “dose de tolerância”, estabelecida em 0,2 Roentgen por dia (equivalente a atuais 500 mSv/ano), com base na “dose de eritema”, a dose mínima necessária para causar vermelhidão na pele. Em 1951, essa “dose de tolerância” foi reduzida para 0,5 Roentgen em qualquer semana, para exposição de corpo inteiro, por raios X ou gama, e foi acrescentado que “todo esforço deve ser feito para reduzir as exposições a todos os tipos de radiação ionizante ao menor nível possível”. Nessa época também foi afirmado que o propósito da proteção radiológica era evitar os efeitos determinísticos nas exposições ocupacionais, mantendo as doses abaixo dos limiares de dose.

Em 1954, apareceu a primeira recomendação da ICRP relacionada à restrição da exposição para membros do público em geral, afirmando que nenhum nível de radiação acima da radiação de fundo pode ser considerado absolutamente seguro. A importância dos efeitos estocásticos foi formalmente reconhecida na publicação de 1958, conhecida como Publicação 1, pois foi a primeira de uma série publicada pela Pergamon Press. Nessa publicação a ICRP adotou a hipótese da ausência de limiar de dose para efeitos

estocásticos, adotando o modelo de linearidade dose-efeito. O limite de dose foi diminuído para o equivalente a 50 mSv/ano. Entretanto, somente em 1966 a ICRP resumiu os conhecimentos sobre os riscos associados à radiação, somáticos e genéticos. A partir daí, a proteção radiológica passou a dar maior ênfase aos efeitos estocásticos que aos efeitos determinísticos da radiação ionizante (CLARKE & VALENTIN, 2005).

3.4.3. O sistema de proteção radiológica da ICRP

A filosofia atual da radioproteção começou a ser estabelecida Publicação 26 da ICRP, de 1977. Nessas “Recomendações” se estabeleceu um novo sistema de limitação de doses e os três princípios básicos de proteção radiológica foram explicitados. De acordo com esses princípios (i) nenhuma prática com radiação ionizante deveria ser adotada ao menos que sua introdução produzisse um benefício líquido, (ii) todas as exposições deveriam ser mantidas tão baixas quanto razoavelmente exequível, considerando os fatores econômicos e sociais, e (iii) as doses individuais não deveriam exceder os limites recomendados pela ICRP. Nesse trabalho, os riscos dos efeitos estocásticos foram quantificados pela primeira vez (CLARKE & VALENTIN, 2005; ICRP, 1977).

Em 1990, a ICRP revisou completamente suas recomendações de proteção radiológica, publicando-as em 1991, na Publicação 60. Com base nas revisões das estimativas do risco de exposição à radiação, os limites de dose foram reduzidos, a necessidade de otimização foi enfatizada e os princípios básicos foram reunidos em um “Sistema de Proteção Radiológica” (CLARKE & VALENTIN, 2005; ICRP, 1991).

Mais recentemente, novas modificações foram introduzidas nas Recomendações de da ICRP. Na Publicação 103, de 2007, os princípios básicos de justificação, otimização e limitação de doses foram mantidos, mas houve uma tentativa de abordá-los de uma forma mais holística, de modo a cobrir todas as situações de exposição, existentes, planejadas ou emergenciais. Os limites de dose para trabalhador e público foram mantidos, mas houve alterações nos fatores de peso das radiações e dos tecidos, que foram adequados aos novos conhecimentos sobre os efeitos físicos e biológicos das radiações ionizantes. O princípio da otimização da proteção foi ainda mais reforçado, com ênfase no uso de restrições para situações de exposições planejadas. As estimativas de risco sofreram pequenas modificações, ficando os coeficientes de risco nominal para efeitos estocásticos estabelecido em $5,5 \times 10^{-2}/\text{Sv}$ para câncer e $0,2 \times 10^{-2}/\text{Sv}$ para efeitos hereditários, para a população total (ICRP, 2007a).

A ICRP também tem publicado recomendações de proteção radiológica específicas para a área médica. A Publicação ICRP 73, de 1996, teve por objetivo esclarecer como o sistema de proteção radiológica descrito na ICRP 60 deve ser aplicado no uso das radiações em medicina (ICRP, 1996). A Publicação 105, de 2007, também abordou a aplicação dos princípios básicos de proteção radiológica na área médica, com foco nos diferentes aspectos da proteção do paciente, incluindo acompanhantes e voluntários em pesquisa biomédica (ICRP, 2007b).

Mais recentemente, a Publicação 121, de 2013, abordou especificamente a proteção de pacientes pediátricos em radiologia diagnóstica e intervencionista. Esse trabalho objetivou fornecer princípios de proteção radiológica para clínicos que solicitam exames radiológicos e para o pessoal que trabalha com procedimentos diagnósticos ou intervencionistas em crianças e adolescentes. Foi enfatizada a importância de uma rigorosa justificativa de cada procedimento radiológico, avaliando métodos alternativos que não façam uso de radiação ionizante, e ainda, a necessidade de otimização. Nesse caso, além do ajuste dos parâmetros técnicos que considerem a grande variação de tamanho (e peso) nesses pacientes, recomenda-se o uso de blindagens protetoras e de tamanho de campo e colimação adequados (ICRP, 2013).

3.4.4. Regulamentação da proteção radiológica no Brasil

As recomendações da ICRP, fundamentadas no modelo de risco de linearidade dose-efeito, sem limiar de dose, são frequentemente a base para o estabelecimento de regulamentações sobre proteção radiológica por outras organizações internacionais, como a Agência Internacional de Energia Atômica (*International Atomic Energy Agency, IAEA*) e por autoridades regulatórias nacionais.

As primeiras regulamentações relativas à proteção radiológica no Brasil apareceram em 1973, na forma da Resolução nº 06/1973, Normas Básicas de Proteção Radiológica, da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), a entidade responsável por regular e fiscalizar o uso da energia nuclear no Brasil. Essa resolução foi substituída pela norma CNEN-NE-3.01, Diretrizes Básicas de Radioproteção, de 1998. Esse regulamento técnico, baseado na ICRP 26, foi posteriormente atualizado, originando a Norma CNEN-NN-3.01, Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica, de 2005, baseada na ICRP 60 (CNEN, 2005). Esses regulamentos se aplicam ao o manuseio, a produção, a posse e a utilização de fontes, bem como ao transporte, armazenamento e deposição de

materiais radioativos, abrangendo todas as atividades relacionadas que envolvam ou possam envolver exposição à radiação e aquelas que envolvam exposição a fontes naturais cujo controle seja considerado necessário pela CNEN.

Embora a definição de fonte nas normas da CNEN inclua equipamentos capazes de emitir radiação ionizante, a Resolução CNEN/CD 48/2005 estabeleceu que as práticas de radiodiagnóstico médico e odontológico são regulamentadas por Portaria do Ministério da Saúde.

3.5. PROTEÇÃO RADIOLÓGICA EM RADIODIAGNÓSTICO

O uso dos raios X em medicina no Brasil é atualmente regulamentado pela Portaria 453, Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica em Radiodiagnóstico Médico e Odontológico, emitida pela Secretaria de Vigilância Sanitária do Ministério da Saúde, em 1998. Essa portaria, também baseada nos conceitos estabelecidos pela ICRP 60, contém diretrizes para a proteção da população dos possíveis efeitos indevidos inerentes à utilização dos raios-x diagnósticos, visando minimizar os riscos e maximizar os benefícios desta prática. A portaria também estabelece parâmetros para o controle das exposições médicas, das exposições ocupacionais e das exposições do público, decorrentes das práticas com raios X diagnósticos e estabeleceu requisitos para o licenciamento e a fiscalização dos serviços que realizam procedimentos radiológicos médicos e odontológicos.

3.5.1. Tipos de exposição

Os requisitos estabelecidos pela Portaria 453 se aplicam às exposições ocupacionais, exposições médicas e exposições do público, em situações de exposições normais ou exposições potenciais (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 1998).

A exposição do público é definida como a exposição de membros da população, exceto as exposições ocupacionais, exposições médicas e a exposição natural normal, devida à radiação ambiental do local. A exposição ocupacional é a exposição de um indivíduo em decorrência de seu trabalho. A exposição médica é aquela a que são submetidos pacientes, em decorrência de exames ou tratamentos médicos ou odontológicos, indivíduos não ocupacionalmente expostos que voluntariamente ajudam a confortar ou conter pacientes durante o procedimento radiológico (acompanhantes,

geralmente, familiares ou amigos próximos) e indivíduos voluntários em programas de pesquisa médica ou biomédica e que não proporciona qualquer benefício direto aos mesmos.

3.5.2. Princípios básicos de proteção radiológica

3.5.2.1. Justificação

O princípio da justificação estabelece que nenhuma atividade envolvendo exposição à radiação deve ser adotada ao menos que ela produza benefício líquido suficiente para o indivíduo exposto ou para a sociedade de modo a compensar o detrimento potencialmente causado (ICRP, 2007).

A Portaria 453 do Ministério da Saúde determina que nenhuma prática ou fonte adscrita a uma prática deve ser autorizada a menos que produza suficiente benefício para o indivíduo exposto ou para a sociedade, de modo a compensar o detrimento que possa ser causado. Em medicina e odontologia esse princípio deve ser aplicado considerando:

a) Que a exposição médica deve resultar em um benefício real para a saúde do indivíduo e/ou para sociedade, tendo em conta a totalidade dos benefícios potenciais em matéria de diagnóstico ou terapêutica que dela decorram, em comparação com o detrimento que possa ser causado pela radiação ao indivíduo.

b) A eficácia, os benefícios e riscos de técnicas alternativas disponíveis com o mesmo objetivo, mas que envolvam menos ou nenhuma exposição a radiações ionizantes.

Na área da saúde existem dois níveis de justificação: justificação genérica da prática e justificação da exposição individual do paciente em consideração. A justificação genérica estabelece que todos os novos tipos de práticas que envolvam exposições médicas devem ser previamente justificadas antes de serem adotadas em geral e os tipos existentes de práticas devem ser revistos sempre que se adquiram novos dados significativos acerca de sua eficácia ou de suas consequências. A justificação da exposição individual estabelece que todas as exposições médicas devem ser justificadas individualmente, tendo em conta os objetivos específicos da exposição e as características do indivíduo envolvido.

A Portaria 453 proíbe toda exposição que não possa ser justificada, incluindo (i) a exposição deliberada de seres humanos aos raios X diagnósticos com o objetivo único de

demonstração, treinamento ou outros fins que contrariem o princípio da justificação; (ii) exames radiológicos para fins empregatícios ou periciais, exceto quando as informações a serem obtidas possam ser úteis à saúde do indivíduo examinado, ou para melhorar o estado de saúde da população, (iii) exames radiológicos para rastreamento em massa de grupos populacionais, exceto quando o Ministério da Saúde julgar que as vantagens esperadas para os indivíduos examinados e para a população são suficientes para compensar o custo econômico e social, incluindo o detrimento radiológico, (iv) a exposição de seres humanos para fins de pesquisa biomédica, exceto quando estiver de acordo com a Declaração de Helsinque, e (v) exames de rotina de tórax para fins de internação hospitalar, exceto quando houver justificativa no contexto clínico, considerando-se os métodos alternativos (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 1998).

Na prática, é reconhecido que muitos dos exames radiológicos são desnecessários ou poderiam ser substituídos por exames de imagem que não utilizam radiação ionizante, como ultrassonografia e ressonância magnética (LINET *et al.*, 2012). Assim, a importância da justificação na prática médica deve ser difundida mais adequadamente, como será discutido à frente.

3.5.2.2. Otimização

O princípio da otimização estabelece que nas exposições a radiação ionizante, a magnitude das doses individuais, o número de pessoas expostas e a probabilidade de exposições acidentais sejam tão baixos quanto razoavelmente exequíveis (princípio ALARA), levando-se em conta fatores sociais e econômicos, além das restrições de dose aplicáveis (ICRP, 2007).

De acordo com a Portaria 453, a otimização da proteção deve ser aplicada em dois níveis, nos projetos e construções de equipamentos e instalações, e nos procedimentos de trabalho. No emprego das radiações em medicina e odontologia, deve-se dar ênfase à otimização da proteção nos procedimentos de trabalho, por possuir uma influência direta na qualidade e segurança da assistência aos pacientes.

As exposições médicas de pacientes devem ser otimizadas ao valor mínimo necessário para obtenção do objetivo radiológico (diagnóstico e terapêutico), compatível com os padrões aceitáveis de qualidade de imagem. Para tanto, no processo de otimização de exposições médicas deve-se considerar (i) a seleção adequada do equipamento e acessórios, (ii) os procedimentos de trabalho, (iii) a garantia da qualidade, (iv) os níveis de

referência de radiodiagnóstico para pacientes, (iv) as restrições de dose para indivíduo que colabore, conscientemente e de livre vontade, fora do contexto de sua atividade profissional, no apoio e conforto de um paciente, durante a realização do procedimento radiológico (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 1998).

O princípio da otimização também é muitas vezes desconsiderado na prática médica. Por exemplo, exames pediátricos são muitas vezes realizados com o emprego de técnicas estabelecidas para pacientes adultos, e em consequência, as doses são maiores que as necessárias (LINET *et al.*, 2012).

3.5.2.3. Limitação das doses individuais

O princípio da limitação de dose estabelece que um limite deve ser aplicado a dose recebida por qualquer indivíduo como resultado de todas as práticas as quais ele é exposto.

Esse princípio não se aplica as exposições médicas, pois se considera que o benefício proporcionado pelo uso de radiações ionizantes seja maior que o detrimento potencialmente causado pela exposição à radiação (ICRP, 2007; MINISTÉRIO DA SAÚDE, 1998).

3.5.3. Requisitos administrativos e operacionais

A Portaria 453 também tornou obrigatórios vários requisitos administrativos e operacionais, para a compra/venda e operação de equipamentos emissores de raios X e para a construção, modificação, operação e desativação de instalações de radiodiagnóstico (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 1998).

Os equipamentos devem ser registrados no Ministério da Saúde e seguir uma série de especificações técnicas, considerando os padrões nacionais e internacionais, além dos requisitos estabelecidos na própria Portaria 453. A manutenção das características técnicas e requisitos de desempenho dos equipamentos de raios X e dos sistemas de detecção/registro de imagem devem ser avaliados periodicamente, evitando que sejam operados fora das condições exigidas.

As instalações devem ser licenciadas pelas autoridades locais. Para tal, devem ser definidas claramente a cadeia de responsabilidades do pessoal do serviço, incluindo dos titulares do serviço, dos médicos radiologistas, do supervisor de proteção radiológica e de todos os demais membros da equipe, etc. A qualificação profissional dos trabalhadores e

as certificações necessárias, também devem ser claramente estabelecidas, incluindo as necessidades de treinamento. Os requisitos de organização também englobam o controle das áreas de serviço, incluindo barreiras físicas, sinalização, controle de acesso e monitoração de área, o programa de monitoração individual, e o programa de garantia de qualidade. Todos esses pontos são integrantes do programa de proteção radiológica e devem constar do memorial descritivo de proteção radiológica, documento básico para o licenciamento das instalações.

3.6. PROTEÇÃO RADIOLÓGICA NAS EXPOSIÇÕES MÉDICAS EM RADIODIAGNÓSTICO

Na prática, os requisitos normativos estabelecidos não são devidamente seguidos. Em particular, os profissionais de saúde frequentemente não estão familiarizados com os dois princípios fundamentais da proteção radiológica nas exposições médicas, a justificação e a otimização. Além disso, o cumprimento dos requisitos administrativos e operacionais muitas vezes é negligenciado pelo serviço, com implicações na proteção radiológica dos pacientes (ICRP, 2013).

3.6.1. Justificação genérica das práticas

Os benefícios de muitos procedimentos de radiodiagnóstico são bem estabelecidos, sendo amplamente aceitos pelos profissionais e pela sociedade. Por outro lado, diversas práticas não podem ser aceitas, pois o risco associado não compensa os benefícios. Por exemplo, é reconhecido o papel da tomografia computadorizada de crânio para a avaliação de traumatismo craniano grave, mas, por outro lado, o uso de raios X abdominal para acompanhamento da gestação não se justifica, pois existem técnicas alternativas que fornecem imagens adequadas sem expor os pacientes à radiação ionizante.

A Portaria 453 proíbe toda exposição que não possa ser justificada, incluindo (i) exposição deliberada de seres humanos aos raios X diagnósticos com o objetivo único de demonstração, treinamento ou outros fins que contrariem o princípio da justificação, (ii) exames radiológicos para fins empregatícios ou periciais, exceto quando as informações a serem obtidas possam ser úteis à saúde do indivíduo examinado, ou para melhorar o estado de saúde da população, (iii) exames radiológicos para rastreamento em massa de grupos populacionais, exceto quando o Ministério da Saúde julgar que as vantagens esperadas

para os indivíduos examinados e para a população são suficientes para compensar o custo econômico e social, incluindo o detrimento radiológico, (iv) a exposição de seres humanos para fins de pesquisa biomédica, exceto quando estiver de acordo com a Declaração de Helsinque, (v) exames de rotina de tórax para fins de internação hospitalar, exceto quando houver justificativa no contexto clínico, considerando-se os métodos alternativos.

Deve ressaltado que todo novo procedimento envolvendo exposição à radiação ionizante deve ser bem avaliado, pois frequentemente os benefícios resultantes são mais facilmente reconhecidos que os possíveis danos associados.

3.6.2. Justificação das exposições individuais

A justificação da exposição em radiologia diagnóstica inclui a eliminação ou redução de exames desnecessários. Para isso, é fundamental que sejam realizados apenas os exames que sirvam para confirmar ou afastar determinada hipótese diagnóstica, o que pode ser obtido simplesmente com uma melhor anamnese e exame físico adequado do paciente. Também deve ser considerada a história clínica do paciente, incluindo exames realizados anteriormente.

Ainda em relação à justificação, devem ser evitados exames de baixa qualidade diagnóstica, com a conseqüente necessidade repetição dos mesmos. Por exemplo, o emprego de métodos de imobilização ou de anestesia/sedação pode evitar a repetição desnecessária de exames em decorrência de artefatos causados pela movimentação do paciente durante o exame.

Outro ponto importante é a escolha do método diagnóstico mais adequado, priorizando aqueles que resultem em doses mais baixas ou que não utilizem radiação ionizante, como a ultrassonografia ou a ressonância magnética nuclear, quando não há diferenças no benefício esperado. Isto é particularmente importante em pacientes que sofrem de doenças crônicas, que exigem exames periódicos.

Frequentemente é o médico que solicita os exames o responsável por garantir a justificação da exposição, mas tem sido documentado que muitos médicos têm pouca consciência das doses e dos riscos associados aos exames de diagnóstico por imagem, não conhecendo os prós e contras das várias modalidades (KRILLE *et al.*, 2010). Por exemplo, um estudo na Alemanha mostrou que os pediatras que solicitam tomografias subestimam a

exposição devida a essa técnica e, por outro lado, superestimam as doses em exames convencionais de raios X (MERZENICH *et al.*, 2012).

Deve ser lembrado que crianças que se submetem a procedimentos de radiodiagnóstico requerem especial atenção. Muitos tecidos e órgãos tem maior sensibilidade aos efeitos danosos da radiação em crianças que em adultos, pois estão em crescimento. Também, os órgãos e tecidos em crianças menores estão mais próximos entre si que em crianças maiores e em adultos, sendo assim mais difícil excluí-los do feixe primário e protegê-los da radiação espalhada. Ainda, crianças e jovens tem uma maior expectativa de vida, e assim tem mais chance de apresentar efeitos tardios.

A escolha do exame adequado pode ser complexa. Por exemplo, o traumatismo craniano é a razão mais comum para a solicitação de tomografias computadorizadas da cabeça. É bem estabelecido que esse é o exame de escolha para a avaliação de pacientes pediátricos com traumatismo craniano moderado ou severo, mas vários trabalhos mostram seu uso indiscriminado para a avaliação de lesões menos graves, nas quais o benefício é menos claro ou mesmo inexistente (ICRP, 2013; LINET *et al.*, 2012).

3.6.2.1. Diretrizes para a prescrição de exames

A fim de minimizar as dificuldades relacionadas à adequada indicação de exames que utilizam a radiação ionizante, diversas entidades têm desenvolvidos guias de referência para auxiliar na indicação da modalidade de imagem mais apropriada para uma determinada situação clínica. Essas guias, elaboradas por grupo de especialistas, ajudam a evitar exames impróprios, mas têm algumas limitações, devendo ser consideradas como um aconselhamento, que deve ser avaliado frente à situação concreta, considerando as tecnologias acessíveis e as condições médicas e sociais do paciente.

O Colégio Americano de Radiologia, nos Estados Unidos, e o Colégio Real de Radiologistas, no Reino Unido, estão entre as instituições que elaboraram guias para decisão clínica. Essas guias sugerem, por exemplo, que a ultrassonografia deve ser considerada como a primeira opção para imagem na avaliação da apendicite aguda em crianças, pois permite avaliar adequadamente estruturas abdominais profundas em crianças. Também é sugerido que casos de traumatismo craniano leve não sejam avaliados por tomografia computadorizada, devido às altas doses de radiação associadas. Também são consideradas não justificadas rotineiramente radiografias de crânio em crianças com epilepsia ou dor de cabeça, radiografia dos seios da face em menores de 6 anos com

suspeita de sinusite, radiografias da coluna cervical em crianças com torcicolo sem trauma, etc. (LINET *et al.*, 2012).

3.6.3. Otimização das exposições médicas

De acordo com a Portaria 453, as exposições médicas de pacientes devem ser otimizadas ao valor mínimo necessário para obtenção do objetivo radiológico, compatível com os padrões aceitáveis de qualidade de imagem. Vários fatores, relacionados aos equipamentos, às técnicas usadas (kV, mAs, área irradiada, etc.) e ao paciente (região examinada, sexo, idade, etc.) devem ser considerados (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 1998).

Os equipamentos de radiodiagnóstico devem ser adequados à sua finalidade, apropriadamente instalados e mantidos, e ainda, ser periodicamente avaliados, através de testes de controle de qualidade.



Figura 14. Perda de cabelo após exposição à tomografia computadorizada
Fonte: http://www.nytimes.com/2010/08/01/health/01radiation.html?_r=0

Para garantir a otimização, os radiologistas e os técnicos e tecnólogos em radiologia devem trabalhar junto aos fabricantes e ao físico médico, de modo a garantir uma adequada supervisão dos equipamentos. Por exemplo, foram relatados diversos casos de exposições excessivas à radiação em tomografias computadorizadas para a avaliação de derrame cerebral por perfusão. Os pacientes afetados, que receberam doses até 8 vezes acima do esperado, apresentaram queda de cabelo e também dor de cabeça, tonturas, perda de memória, confusão mental, convulsões e outros sintomas (figura 14). As investigações indicaram que as doses excessivas foram ocasionadas pelo uso inadequado de um sistema de ajuste automático de dose, teoricamente projetado para diminuir as doses nos pacientes. Foi concluído que os tomógrafos deveriam ter em seu projeto para prevenir as doses em excesso, através de alertas aos operadores, ou simplesmente impedindo sua operação quando as doses estejam em níveis perigosos (LINET *et al.*, 2012).

A otimização inclui também o estabelecimento de medidas para evitar que o procedimento radiológico seja feito na pessoa errada, que uma parte errada do corpo seja examinada, ou que um embrião ou feto seja irradiado de forma inadvertida. A área irradiada deve ser sempre a menor possível, consistente com o objetivo diagnóstico. Além da colimação adequada, o uso de protetor de gônadas e saiotite plumbífera pode auxiliar, exceto quando tais blindagens excluam ou degradem informações diagnósticas importantes (LINET *et al.*, 2012).

O ajuste dos parâmetros técnicos (corrente, tensão, tempo, uso de controle automático de exposição, uso de filtros, etc.) às características do paciente, considerando sua idade e tamanho, é uma etapa fundamental no processo de otimização das doses. Em tomografia computadorizada, também devem ser avaliados outros fatores, como o *pitch* e o andamento da mesa, o número de fases e o pós-processamento de imagens, entre outros. Há que se levar em consideração que exames com doses muito baixas de radiação produzirão imagens mais ruidosas, e assim deve ser feito um balanço entre qualidade da imagem requerida e a dose de radiação associada. Todas essas considerações devem ser aplicadas em todos os pacientes, mas crianças e pacientes obesos requerem atenção especial no ajuste desses parâmetros para a otimização da dose (LINET *et al.*, 2012).

É importante que as doses nos diferentes exames radiodiagnósticos realizados no serviço de imagem sejam avaliadas, usando os protocolos adequados. Essas doses podem ser comparadas com os níveis de referência estabelecidos local ou nacionalmente, que

servem como um dispositivo orientativo na otimização da proteção nas exposições médicas, nas quais os limites de dose individuais não se aplicam.

3.6.3.1. Níveis de referência de dose

Os níveis de referência de dose permitem avaliar se os níveis de dose em uma determinada técnica estão muito altos ou muito baixos em relação a uma referência local, regional ou nacional, servindo assim como ferramenta para a otimização. Na prática, os níveis de referência indicam que um determinado procedimento radiológico deve ser avaliado quando os valores são excedidos. Isso não significa necessariamente que algo errado esteja ocorrendo, mas que algo incomum ocorreu e deve ser analisado e entendido.

Os níveis de referência são geralmente derivados de avaliações regionais ou nacionais das doses em determinados exames, sendo frequentemente estabelecidos como o terceiro quartil da distribuição de dose obtida na avaliação, isto é, o valor de dose abaixo do qual 75% dos exames são feitos. Assim, se espera que a maioria dos exames nos pacientes de uma instituição esteja abaixo dele, e quando doses superiores são obtidas, a razão deve ser avaliada. Por exemplo, o uso de uma grade pode ser desnecessário, ou a tensão de tubo utilizada pode ser inadequada.

Embora os níveis de referência sejam úteis no processo de otimização, eles não são a única ferramenta para esse processo e não garantem que a otimização foi atingida. Por exemplo, um hospital no Reino Unido obteve doses de referência 5 a 25 vezes menores que as doses de referência nacionais, atribuindo esse resultado à otimização cuidadosa de todos os equipamentos e técnicas utilizados. Ainda, doses muito abaixo dos níveis de referência também podem requerer ações corretivas, a fim de melhorar a qualidade de imagem (LINET *et al.*, 2012).

De acordo com a Portaria 453, os exames de radiodiagnóstico devem ser realizados de modo a considerar os níveis de referência de radiodiagnóstico, de modo a permitir a revisão e adequação dos procedimentos e técnicas quando as doses excederem os valores especificados (como parte do programa de otimização). A Portaria 453 estabelece níveis de referência para vários tipos de exames de raios X diagnósticos médico e odontológico e para mamografia, usando dose de entrada na pele, e para tomografia computadorizada, usando a dose média em cortes múltiplos. Esses níveis foram estabelecidos apenas para um paciente adulto típico, não se aplicando a pacientes pediátricos (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 1998).

3.6.4. Educação e Treinamento

Todas as pessoas envolvidas em atividades com fontes de radiação devem ser adequadamente treinadas de modo a assimilar a necessidade de respeitar os regulamentos de segurança e proteção radiológica, estando cientes dos riscos associados ao emprego de radiações ionizantes. A implantação de um programa de treinamento anual, integrante do programa de proteção radiológica, está entre os requisitos estabelecidos pela Portaria 453 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 1998).

A necessidade do treinamento de médicos, tanto dos radiologistas quanto daqueles que prescrevem exames que utilizam radiação ionizante, assim como dos técnicos e tecnólogos que realizam esses exames tem sido bastante enfatizada. No caso de radiologia pediátrica o treinamento deve incluir as particularidades associadas a esses exames e devem ser enfatizados os aspectos operacionais da proteção radiológica e da redução de doses nesse grupo de pacientes, além de informações sobre novas técnicas e tecnologias. Material adequado para esses treinamentos pode ser encontrado nos sítios da ICRP (www.icrp.org), Agência Internacional de Energia Atômica (www.iaea.org) e no site da campanha *Image Gently* (www.imagegently.org) na Internet.

3.6.4.1. A campanha *Image Gently*

O dramático crescimento do número de tomografias computadorizadas em crianças, junto às doses relativamente altas nesses exames, gerou grande preocupação quanto aos potenciais riscos associados, como discutido anteriormente. Essa preocupação ultrapassou as discussões científicas e chegou aos meios de comunicação, atingindo a população em geral (figura 15).

Por outro lado, é inquestionável que esses exames são fundamentais para o diagnóstico de diversas doenças em crianças, tendo grande impacto no seu tratamento e prognóstico. Assim, surgiram várias iniciativas para divulgar a necessidade de minimizar as doses associadas ao uso da radiação ionizante em radiodiagnóstico, em particular em tomografia pediátrica, sem comprometer a qualidade diagnóstica.

Os riscos ocultos do uso abusivo de tomografias

Por JANE E. BRODY

A radiação, assim como o álcool, é uma faca de dois gumes. Ela tem utilidades médicas indiscutíveis ao revelar problemas ocultos, de fraturas ósseas e lesões pulmonares a defeitos cardíacos e tumores. E pode ser usada até para tratar e eventualmente curar certos tipos de câncer.

Mas a radiação também tem um sério efeito colateral: a possibilidade de danificar o DNA e, 10 a 20 anos depois, causar câncer.

Acredita-se que tomografias computadorizadas, que usam de 100 a 500 vezes mais radiação do que uma radiografia comum e hoje respondem por três quartos da exposição dos norte-americanos à radiação, causem 1,5% de todos os casos de câncer diagnosticados nos Estados Unidos.

Figura 15: Artigo na imprensa sobre o uso abusivo e risco em tomografia computadorizada.

Fonte: <http://www1.folha.uol.com.br/fsp/newyorktimes/65408-os-riscos-ocultos-do-uso-abusivo-de-tomografias.shtml>

Uma dessas iniciativas é a campanha *Image Gently* (IMAGE GENTLY, 2014), criada em 2007 por quatro organizações norte-americanas: a Sociedade de Radiologia Pediátrica (*Society for Pediatric Radiology*), o Colégio Americano de Radiologia (*American College of Radiology*), a Sociedade Americana para Tecnólogos em Radiologia (*American Society for Radiologic Technologists*) e a Associação Americana de Físicos em Medicina (*American Association of Physicists in Medicine*), que juntas formaram a Aliança para Segurança Radiológica em Imagem Pediátrica (*Alliance for Radiation Safety in Pediatric Imaging*). Posteriormente, 78 sociedades médicas e odontológicas em todo o mundo se juntaram a Aliança, comprometendo-se a (i) usar a menor dose efetiva de radiação, (ii) garantir que os procedimentos de imagem são necessários e adequados, (iii) aumentar a sensibilização relativa as doses, (iv) educar o público e (v) defender a segurança da criança em procedimentos de imagem.

A missão da campanha é “mudar as práticas”, local, nacional e internacionalmente, através do aumento da conscientização e do fornecimento de oportunidades para a diminuição da dose de radiação em exames de imagem pediátricos.

A *Image Gently* considera que para a obtenção de um melhor resultado, médicos, físicos médicos e tecnólogos em radiologia devem trabalhar juntos na criação de melhores protocolos. Iniciada com foco em tomografia computadorizada (figura 16), atualmente a campanha também abrange fluoroscopia, radiologia intervencionista, radiologia digital (figura 17), radiografia odontológica e medicina nuclear.



Figura 16: Recomendações do *Image Gently* em tomografia computadorizada
Fonte: www.imagegently.org

A estratégia principal da campanha é fornecer informações e materiais educativos sobre diagnóstico por imagem, eliminando as barreiras para a implementação das “melhores práticas”, a nível local, em todo o mundo. Há uma grande variedade de material, incluindo folhetos educacionais, artigos, apresentações em *power point*, etc.,

projetados para radiologistas, tecnólogos, físicos e também para pais de crianças que realizam exames radiológicos. Essa divulgação é feita usando meios impressos e eletrônicos, incluindo redes sociais. O material disponibilizado inclui informação para os pais sobre os benefícios e potenciais riscos em procedimentos de imagem que usam radiação ionizante, traduzidos em dezesseis línguas.

A campanha também atua junto a fabricantes de equipamentos de imagem para ajudar a tornar os tomógrafos mais adequados aos esforços para redução de doses. Um exemplo é sua atuação pela adoção de uma terminologia única em radiologia digital, facilitando a compreensão pelos usuários e melhorando o uso seguro desses equipamentos.

Além disso, a campanha *Image Gently* tem fornecido protocolos e informações necessárias para ajudar na redução da dose nos pacientes. Entre os critérios sugeridos pelo *Image Gently* para exames de tomografia computadorizada estão (STRAUSS *et al.*, 2010):

- Determinar se a tomografia computadorizada está justificada pela indicação clínica;
- Quando apropriado, usar técnicas de imagem que não façam uso da radiação ionizante;
- Aumentar a consciência e o entendimento sobre as doses de radiação entre os técnicos e tecnólogos em radiologia, que são os responsáveis pela realização dos exames;
- Recorrer aos serviços de um físico médico qualificado, considerando que os aspectos técnicos associados a uma imagem de qualidade apropriada em condições de dose reduzida pode ser complexos;
- Estabelecer doses para pacientes pediátricos ajustando os parâmetros de varredura para o tamanho do paciente;
- Otimizar os parâmetros de exames pediátricos; o campo de varredura e a colimação devem ser adequados ao tamanho do paciente e os parâmetros de exposição devem ser ajustados;
- Fazer a varredura somente da área indicada, e uma única vez, preferencialmente em fase única e evitando repetições desnecessárias;

Além disso, deve ser recomendada atenção na imobilização do paciente, quando necessário e os usos de blindagens, quando possível, para minimizar a exposição de órgãos sensíveis.

Para exames de raios X convencionais, mesmo que a dose de radiação utilizada seja muito pequena, ainda assim é necessário otimizar as técnicas de maneira a reduzi-las a níveis tão baixos quando exequíveis. O *Image Gently* sugere:

- Fazer o exame de imagem apenas quando houver um benefício médico;
- Usar a menor dose de radiação necessária para a obtenção de uma imagem adequada, considerando o tamanho da criança;
- Estudar somente as áreas de interesse (colimação adequada);
- Evitar múltiplos exames radiológicos (repetir a imagem somente quando for necessário);
- Uso de blindagens (protetor de gônadas, protetor de tireoide, etc.);
- Usar métodos de diagnósticos alternativos (ultrassom ou ressonância magnética nuclear) quando for possível.
- Evitar o uso de grades para partes do corpo com menos 10-12 cm de espessura.



Figura 17: Recomendações do *Image Gently* em radiologia digital pediátrica.

Fonte: <http://www.imagegently.org>

Uma campanha similar, a “Image Wisely” (<http://www.imagewisely.org>), é focada na proteção radiológica de adultos nas exposições médicas, tendo como objetivos a diminuição da quantidade de radiação usada nos estudos de imagem necessários e a

eliminação dos estudos desnecessários. Essa campanha é liderada pelo Colégio Americano de Radiologia e pela Sociedade Radiológica Norte Americana e oferece recursos e informação para radiologistas, físicos médicos, técnicos e tecnologistas e pacientes.

Trabalhos recentes sugerem que o número de tomografias computadorizadas em pediatria se estabilizou ou está diminuindo nos países desenvolvidos. Embora parte dessa redução possa ser atribuída a uma maior conscientização sobre os riscos associados a essas práticas, as práticas disseminadas pelo *Image Gently* não foram ainda completamente adotadas, mesmo em países como os Estados Unidos (GOSKE *et al.*, 2012). Nos países em desenvolvimento, onde a disseminação de uma cultura de proteção radiológica pode ser mais difícil, os exames de tomografia computadorizada pediátrica ainda estão em franco crescimento (VASSILEVA *et al.*, 2012).

Assim, é fundamental que a educação e treinamento sobre os riscos associados ao uso da radiação ionizante e as boas práticas de proteção radiológica, em particular na medicina, sejam estimulados.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo constitui-se de uma revisão bibliográfica, no qual se consultou livros, periódicos e artigos, além de sítios na Internet.

5. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

O uso das radiações ionizantes em medicina se iniciou logo após a descoberta dos raios X e da radioatividade, no final do século XIX. Desde então, o desenvolvimento das aplicações das radiações ionizantes em diagnóstico e terapia tem causado grande impacto na medicina. Atualmente, se estima que 20% da dose efetiva média anual global por pessoa é devida ao uso das radiações em medicina, principalmente para fins diagnósticos.

O conhecimento sobre os efeitos danosos da radiação e as primeiras medidas de proteção contra esses efeitos também se iniciaram no final do século XIX, tendo apresentado grande desenvolvimento desde então. Dentre os efeitos danosos da radiação na saúde o câncer é considerado o mais importante sob uma perspectiva de saúde pública.

Vários autores têm relacionado o aumento no número de casos de câncer em diversas populações ao uso crescente da radiação ionizante para fins de diagnóstico, e recentemente foi demonstrado um aumento na incidência de câncer após tomografia computadorizada em crianças e adolescentes. Embora a tomografia computadorizada seja um método diagnóstico extremamente importante, as doses associadas a esse exame são particularmente altas, e o aumento na frequência desses exames tem causado preocupação quanto aos possíveis riscos associados. Isso é particularmente importante em pediatria, pois crianças frequentemente recebem maiores doses de radiação e fazem parte do grupo mais radiosensível.

Nas aplicações médicas da radiação ionizante, a responsabilidade pela proteção radiológica do paciente é de todos os envolvidos, do médico que prescreve o exame aos técnicos e tecnólogos que o realizam. Entretanto, é sabido que esses profissionais frequentemente têm deficiências no conhecimento sobre efeitos biológicos da radiação e princípios básicos e operacionais de proteção radiológica. Assim, investimentos na educação e treinamentos desses profissionais são fundamentais para a adequada proteção radiológica dos pacientes, minimizando o risco sem limitar os benefícios.

Iniciativas como o Programa de Pós-Graduação em Proteção Radiológica e Segurança de Fontes Radioativas do Instituto de Radioproteção e Dosimetria da Comissão Nacional de Energia Nuclear contribuem para esse fim, formando profissionais preparados para adquirir e disseminar esse conhecimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAUER, S. *et al.*, 2005, “Radiation exposure due to local fallout from Soviet atmospheric nuclear weapons testing in Kazakhstan: solid cancer mortality in the Semipalatinsk historical cohort 1960-1999”, *Radiat. Res.* v. 164, n. 4 (Pt. 1), pp. 409-419.

BERRINGTON DE GONZÁLEZ, A.; DARBY, S., 2004, *et al.*, “Risk of cancer from diagnostic X-rays: estimates for the UK and 14 other countries”, *Lancet*, v. 363 n. 9406, pp. 345-351.

BERRINGTON DE GONZÁLEZ, A. *et al.*, 2009, “Projected cancer risks from computed tomographic scans performed in the United States in 2007”, *Arch. Intern. Med.*, v. 169 n. 22, pp. 2071-2077.

BHATTI, P. *et al.*, 2010, “Risk of second primary thyroid cancer after radiotherapy for a childhood cancer in a large cohort study: an update from the childhood cancer survivor study”, *Radiat. Res.*, v. 174 n. 6, pp. 741-752.

BRENNER, D.J.; HALL, E.J., 2007, “Computed tomography: an increasing source of radiation exposure”, *N. Engl. J. Med.* v. 357 n. 22, pp. 2277-2284.

CARDIS, E. *et al.*, 2005, “Risk of cancer after low doses of ionising radiation: retrospective cohort study in 15 countries”, *BMJ*, v. 331 n. 7508, pp. 77.

CARDIS, E. *et al.*, 2007, “The 15-Country Collaborative Study of Cancer Risk among Radiation Workers in the Nuclear Industry: estimates of radiation-related cancer risks”, *Radiat. Res.* v. 167, pp. 396-416.

CLARKE, R.; VALENTIN, J., 2005, “A history of the international commission on radiological protection”, *Health Phys.*, v. 88 n. 6, pp. 717-732.

CNEN, 2005, *Diretrizes básica de proteção radiológica*. Resolução CNEN 27/2004, Comissão Nacional de Energia Nuclear, Brasil.

DOLL, R.; WAKEFORD, R., 1997, “Risk of childhood cancer from fetal irradiation”, *Br. J. Radiol.*, v. 70, pp. 130–139.

GOSKE, M.J. *et al.*, 2012, “Image Gently 5 years later: what goals remain to be accomplished in radiation protection for children?”. *AJR Am J Roentgenol*, v. 199, pp. 477-479.

HALL, E.J.; GIACCIA, A.J., 2006, *Radiobiology for the Radiologist*, 6 ed., Lippincott Williams & Wilkins.

IARC, 2012, *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*, IARC Monographs 100 (B), International Agency for Cancer Research.

ICRP, 1977, *Recommendations of the ICRP*, ICRP Publication 26. *Ann. ICRP* 1 (3). International Commission on Radiological Protection.

ICRP, 1991, *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 60. *Ann. ICRP*, v. 21, pp. 1-3. International Commission on Radiological Protection.

ICRP, 1996, *Radiological Protection and Safety in Medicine*. ICRP Publication 73. *Ann. ICRP* 26 (2). International Commission on Radiological Protection.

ICRP, 2007a. *2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. ICRP Publication 103 (Users Edition). *Ann. ICRP* 37 (2-4). International Commission on Radiological Protection.

ICRP, 2007b. *Radiological Protection in Medicine*. ICRP Publication 105. *Ann. ICRP* 37 (6). International Commission on Radiological Protection.

ICRP, 2013. *Radiological protection in paediatric diagnostic and interventional radiology*. ICRP Publication 121. *Ann. ICRP* 42(2). International Commission on Radiological Protection.

IMAGE GENTLY. Website www.imagegently.org. Acessado em 14 de agosto de 2014.

INCA, Fisiopatologia do câncer. In: *Políticas públicas de Saúde*, cap. 2 [nd.]

JUNQUEIRA, L. C.; CARNEIRO, J., 2012, *Biologia Celular e Molecular*. 9 ed. Guanabara Koogan, Rio de Janeiro.

KENDALL, G.M. *et al.*, 2013, “A record-based casecontrol study of natural background radiation and the incidence of childhood leukaemia and other cancers in Great Britain during 1980-2006”, *Leukemia*, v. 27 n.1, pp. 3–9.

KRILLE, L. *et al.*, 2010, “Systematic review on physician’s knowledge about radiation doses and radiation risks of computed tomography”, *Eur. J. Radiol.* v.76, pp. 36-41.

LINDELL, B., 1996, “The history of radiation protection”, *Radiation Protection Dosimetry*, v. 68 n. 1/2, pp. 83-95.

LINET, M.S. *et al.*, 2012, “Cancer risks associated with external radiation from diagnostic imaging procedures”. *CA: Cancer J. Clin.*, v. 62 n. 2, pp. 75-100.

MATHEWS, J.D. *et al.*, 2013, “Cancer risk in 680,000 people exposed to computed tomography scans in childhood or adolescence: data linkage study of 11 million Australians”, *BMJ*, 346: f2360doi:10.1136/bmj.f2360.

METTLER, F.A.JR. *et al.*, 2009, “Radiologic and nuclear medicine studies in the United States and worldwide: frequency, radiation dose, and comparison with other radiation sources: 1950-2007”, *Radiology*, v. 253, n. 2, pp. 520-531.

METTLER, F.A. JR. *et al.*, 2008, “Effective Doses in Radiology and Diagnostic Nuclear Medicine”, *A Catalog. Radiology*, v. 248, pp. 254-263.

MERZENICH, H *et al.*, 2012, “Paediatric CT scan usage and referrals of children to computed tomography in Germany: a cross-sectional survey of medical practice and awareness of radiation related health risks among physicians”, *BMC Health Serv. Res.*, v. 25, pp. 12:47.

MINISTÉRIO DA SAÚDE, 1998, Secretaria de Vigilância Sanitária. *Portaria SVS/MS n° 453*.

MOLE, R.H., 1990, “Childhood cancer after prenatal exposure to diagnostic X-ray examinations in Britain”, *Br. J. Cancer*, v. 62, pp. 152–168.

MUIRHEAD, C.R. *et al.*, 2009, “Mortality and cancer incidence following occupational radiation exposure: third analysis of the National Registry for Radiation Workers”, *British Journal of Cancer*, v. 100 n.1, pp. 206–212.

NCRP, 2009, *Ionizing Radiation Exposure of the Population of the United States: 2006*, Report No. 160, National Council on Radiation Protection and Measurements.

NRC. 2006, *Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation*, BEIR VII—Phase 2. Washington, DC: National Academies Press, National Research Council.

PEARCE, M.S. *et al.*, 2012, “Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: a retrospective cohort study”, *Lancet*, v. 380 n. 9840, pp. 499-505.

PRESTON, D.L. *et al.*, 2007, “Solid Cancer Incidence in Atomic Bomb Survivors: 1958–1998”, *Radiat. Res.*, v. 168 n. 1, pp. 1-64.

RON, E *et al.*, 1988, “Tumors of the brain and nervous system after radiotherapy in childhood”, *N. Engl. J. Med.*, v. 319, pp. 1033–1039.

SADETZKI, S. *et al.*, 2005, “Long-term follow-up for brain tumor development after childhood exposure to ionizing radiation for “tinea capitis”, *Radiat. Res.*, v.163 n. 4, pp. 424-432.

SCHONFELD, S.J. *et al.*, 2013, “Solid cancer mortality in the Techa River cohort 1950-2007”, *Radiat. Res.*, v. 179 n. 2, pp. 183–189.

SIGURDSON, E. *et al.*, 2005, “Primary thyroid cancer after a first tumour in childhood (the Childhood Cancer Survivor Study): a nested case-control study”, *Lancet*, v. 365 n. 9476, pp. 2014-2023.

STRAUSS, K.J. *et al.*, 2010, “Image gently: Ten steps you can take to optimize image quality and lower CT dose for pediatric patients”, *AJR: Am. J. Roentgenol*, v. 194 n. 4 pp. 868-873.

TAUHATA, L. *et al.*, 2014, *Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos*. 10. Ed, IRD/CNEN, Rio de Janeiro.

UNSCEAR, 2008, *Sources and effects of ionizing radiation*. Report to the General Assembly with annexes. New York, NY, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.

VASSILEVA, J., *et al.*, 2012, “IAEA survey of pediatric CT practice in 40 countries in Asia, Europe, Latin America, and Africa: Part 1, frequency and appropriateness”, *AJR Am J Roentgenol*, v. 198, pp. 1021-1031.

WALKER, J.S., 1989, “The controversy over radiation safety”, *JAMA*, v. 262 n. 5, pp. 664-668

WILLIAMS, D., 2008, “Radiation carcinogenesis: lessons from Chernobyl”, *Oncogene*, v. 27 (Suppl 2), pp. S9-S18.