

Epidemiologia do câncer devido a radiações e a elaboração de recomendações

Epidemiology of cancer due to radiations and development of guidelines

Emico Okuno¹

¹ Professora Doutora do Departamento de Física Nuclear do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (USP) – São Paulo (SP), Brasil.

Resumo

Este artigo de revisão discorre sobre as comissões de proteção às radiações ionizantes e não ionizantes e sobre os processos para o estabelecimento de recomendações de limites de exposição. Descrevemos um pouco sobre a história da criação de comissões e sobre os tipos de estudos epidemiológicos, a partir dos quais são estimados os fatores de risco. Serão apresentados alguns resultados recentes de estudos epidemiológicos com sobreviventes das explosões de bombas no Japão e as dificuldades inerentes. Por fim, são relatadas as recomendações internacionais em vigor.

Palavras-chave: radiações ionizantes e não ionizantes; epidemiologia; fator de risco; limites de exposição.

Abstract

This review article describes the ionizing and non-ionizing radiation protection commissions and the development processes of the guidelines for limiting exposure to these radiations. We briefly describe the history of these commissions and the types of epidemiological studies from which the risk factors are evaluated. Some recent results obtained from epidemiological studies of atomic bomb survivors in Japan and the inherent difficulties will be presented. At last the current international recommendations will be presented.

Keywords: ionizing and non-ionizing radiations; epidemiology; risk factor; exposure limits.

Introdução

A elaboração de recomendações internacionais de proteção às radiações ionizantes e não ionizantes é feita por grupos de trabalho nomeados por comitês internacionais, que de tempos em tempos as atualizam à medida que novos conhecimentos são obtidos. O processo para se chegar às recomendações segue um caminho bastante longo. Partem principalmente dos resultados de estudos epidemiológicos e de pesquisas em laboratórios que fornecem as bases para a estimativa de riscos associados a determinados agentes que, por sua vez, são usados para o estabelecimento de limites de exposição.

Comissões internacionais e nacionais

Existem várias comissões internacionais, principalmente relativas às radiações ionizantes. Citarei aqui somente as mais importantes. Essas comissões se reúnem regularmente em intervalos de poucos anos, elaborando recomendações ou

atualizando as já existentes. As comissões trabalham em parceria e têm relações oficiais com: Organização Mundial da Saúde (WHO), Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), Organização Internacional do Trabalho (ILO), Comitê Científico das Nações Unidas sobre o Efeito das Radiações Atômicas (UNSCEAR), Programa Ambiental das Nações Unidas (UNEP), entre outros.

Radiações ionizantes: comissões internacionais

Em 1925 foi organizado o 1º Congresso Internacional de Radiologia em Londres. Nesse evento foi criada, a pedido de radiologistas, uma comissão que foi chamada International X-Ray Unit Committee, posteriormente mudado para International Commission on Radiological Units and Measurements (ICRU) para elaborar grandezas e unidades com a finalidade de 'dosar' a quantidade de radiação usada em aplicações médicas, bem como de uniformizar procedimentos de medidas¹. Os raios X haviam sido descobertos por Roentgen em dezembro de 1895 e desde então estavam sendo amplamente utilizados no mundo todo. Cada país media o nível de raios X com unidade

Correspondência: Instituto de Física da Universidade de S. Paulo – Rua do Matão, travessa R, 187 – CEP 05508-090 – São Paulo (SP), Brasil – E-mail: emico.okuno@dfn.if.usp.br

própria, que diferia da que era usada em outro país, porque não havia nem grandezas físicas nem unidades de medida com aceitação internacional. A ICRU introduziu a primeira grandeza relativa à área, que se chamou exposição e para sua unidade o roentgen (r) em 1928, mais tarde modificado para (R) e depois para (C/kg) no sistema internacional (SI); introduziu ainda a dose absorvida (rad) em 1953, o equivalente de dose (rem) em 1962, e suas novas unidades no SI, o gray (Gy) em 1975 e o sievert (Sv), em 1979, respectivamente. Hoje há uma quantidade imensa de grandezas, e para complicar, muitas delas têm a mesma unidade sievert (Sv).

No 2º Congresso Internacional de Radiologia, que se realizou em 1928 em Estocolmo, foi criado o International X Ray and Radium Protection Committee, cujo nome foi mudado em 1950 para International Commission on Radiological Protection (ICRP)². Essa é uma comissão da Sociedade Internacional de Radiologia. Teve por missão elaborar guias de proteção radiológica e estabelecer limites de exposição às radiações ionizantes para indivíduos ocupacionalmente expostos, que foram chamados trabalhadores, e para público em geral. Em 1934, os sete membros da comissão propuseram pela primeira vez o valor de nível permissível de taxa de exposição de 0,2 r/dia. Com o advento do Projeto Manhattan, a questão da proteção radiológica se tornou importante e em 1952, na reunião da comissão compareceram geneticistas de sete países, quando alteraram o limite para 0,3 r/semana para trabalhadores. A recomendação mais recente relativa à proteção radiológica está na ICRP Publicação 103: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection³, que substituiu a ICRP Publicação 60 de 1990⁴, que por sua vez substituiu a ICRP Publicação 26 de 1977⁵ e assim por diante.

Radiações ionizantes: comissão nacional

Cada país tem um órgão que faz adequações nas recomendações internacionais e as adota para regulamentar o uso das radiações. No Brasil, tal órgão é a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), que foi criada através do Decreto 40.110 em 10 de outubro de 1956. Em setembro de 1973, a CNEN elaborou as “Normas básicas de proteção radiológica”, cuja atualização mais recente é o documento NN-3.01, “Diretrizes básicas de proteção radiológica”, de janeiro de 2005 e publicada no Diário Oficial da União em 18 de janeiro de 2006. Esta norma é uma tradução com adaptação da ICRP Publicação 60 de 1990⁴.

Radiações não ionizantes: comissão internacional

A International Radiation Protection Association (IRPA) foi fundada em 1964 sob o patrocínio da Health Physics Society dos Estados Unidos, à qual a Associação Brasileira de Física Médica se filiou em 1989. Uma de suas funções é organizar congressos regionais e internacionais.

Em junho de 1974, a IRPA formou um grupo de trabalho para realizar pesquisas em radiações não ionizantes a fim de elaborar guias. Em 1977, no 4º Congresso da IRPA,

em Paris, esse grupo recebeu o nome de International Non-Ionizing Radiation Committee (INIRC). E em 1992, no 8º Congresso da IRPA, em Montreal, o nome do grupo foi mudado para International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Ela trabalha em colaboração com a WHO, o UNEP, a Agência Internacional de Pesquisa em Câncer (IARC), a Organização Meteorológica Internacional (WMO), entre outros. Para cada faixa da onda eletromagnética não ionizante, englobando a radiação ultravioleta, visível, infravermelha, micro-ondas e radiofrequência e frequência baixa, é constituído um subcomitê especializado para a elaboração das recomendações de proteção.

A elaboração das recomendações e o estabelecimento de limites de exposição das radiações não ionizantes seguem um organograma complexo. A ICNIRP forma um grupo de experts de diferentes áreas, que analisa e faz revisão de todos os artigos científicos publicados até então em Epidemiologia, Biologia, Física e Dosimetria, separando aqueles que são confiáveis dos não confiáveis, por falta de dados, por exemplo. Concomitantemente, a IARC elabora monografia na qual identifica e classifica agentes, substâncias, fatores ambientais ou estilo de vida que podem aumentar o risco de seres humanos a terem câncer. A IARC classifica os agentes em grupos: 1 – carcinogênico, 2A – provavelmente carcinogênico, 2B – possivelmente carcinogênico, 3 – não carcinogênico e 4 – provavelmente não carcinogênico. No grupo 2A estão os agentes que apresentam forte evidência de correlação com câncer, porém ainda não conclusivos e no grupo 2B, os agentes com alguma evidência de correlação com câncer, mas ainda longe de se chegar à conclusão. Após a realização dessas duas comissões, a Divisão de Saúde Ambiental da WHO elabora um documento completo chamado Environmental Health Criteria (EHC). Esse inclui uma visão geral das características físicas, técnicas de medida e instrumentação, fontes e aplicações das radiações, uma análise completa da literatura sobre efeitos biológicos e uma avaliação dos riscos à saúde devido à exposição às radiações não ionizantes de cada faixa. Só depois é que a ICNIRP elabora as recomendações internacionais com os limites de exposição.

O EHC 160⁶ relativo à Radiação Ultravioleta (RUV), por exemplo, foi publicado em 1994 sob o patrocínio da UNEP, ILO, ICNIRP e WHO. A IARC, por sua vez, elaborou a monografia Solar and Ultraviolet Radiation em 1992⁷, na qual classificou a radiação solar no grupo 1 e as radiações UVA, UVB e UVC no grupo 2A; também publicou outra monografia sobre protetores solares em 2001⁸. As últimas recomendações para a RUV da ICNIRP foram publicadas em 2004⁹, que substituíram as de 1996.

Com relação às ondas eletromagnéticas de frequência alta e campos eletromagnéticos de 50 a 60 Hz, a IRPA/INIRC havia emitido as recomendações respectivamente em 1988 e 1990, que foram atualizadas em 1998 pela recomendação ICNIRP, atualmente em vigor: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)¹⁰. A ICNIRP continua desde então trabalhando no sentido de que essa

recomendação seja harmonizada, isto é, usada por todos os países do mundo. Entretanto, isso não aconteceu pois alguns países rejeitaram essas recomendações e abaixaram os limites de exposição, principalmente no que se refere às micro-ondas emitidas por antenas de telefonia celular. Outra grande preocupação se refere ao campo magnético de 60 Hz, desde que foi classificado em 1992 pela IARC – na monografia Non-ionizing radiation, part 1: static and extremely low frequency (ELF) electric and magnetic fields¹¹ – como pertencente ao grupo 2B, ou seja, como agente possivelmente carcinogênico.

A WHO iniciou o International Electromagnetic Field Project em 1996 para coletar evidências científicas dos possíveis efeitos biológicos dos campos elétricos e magnéticos e eletromagnéticos de 0 a 300 GHz. Muito já foi realizado e a programação é a seguinte: o documento EHC para campos de frequência extremamente baixa, cuja publicação estava prevista para 2003, foi efetivada em 2007, e a ICNIRP espera apresentar as recomendações ainda em 2009; quanto ao documento EHC para campos eletromagnéticos de radiofrequência cuja publicação, originalmente prevista para 2006, foi prorrogada para 2011 e as recomendações da ICNIRP ficaram para 2012.

Radiações não ionizantes: comissão nacional

Não há nenhum órgão responsável para a elaboração das recomendações de proteção e de estabelecimento de limites de exposição a radiações não ionizantes no Brasil.

Em 2 de julho de 2002, a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) apresentou a resolução 303, que aprova o Regulamento sobre limitação da exposição a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos na faixa entre 9 kHz e 300 GHz, além de um anexo a essa resolução baseado nas recomendações da ICNIRP¹⁰. Em 5 de maio de 2009 foi decretada a lei 11.934 pela Presidência da República, que estabelece limites de exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos, associados ao funcionamento de estações transmissoras de radiocomunicação, de terminais de usuário e de sistemas de energia elétrica na faixa de frequência até 300 GHz, visando garantir a proteção da saúde e do meio ambiente. Os limites são os mesmos da ICNIRP¹⁰.

Quanto à radiação ultravioleta, há portarias relativas somente ao bronzamento artificial: CVS-02 do Estado de São Paulo de janeiro de 2000 e CVS-12 de dezembro de 2000, e a Resolução 308 da ANVISA; esta, publicada no Diário Oficial da União em 5 de dezembro de 2002, obriga os fornecedores de câmaras de bronzamento e os estabelecimentos que as usam a atenderem as prescrições da NBR IEC 60335-2-27, sendo uma delas a de apresentar laudo de espectro radiométrico.

Epidemiologia

A epidemiologia – palavra que vem do grego *epi* (sobre) + *demos* (população) + *logos* (estudo) – trata de epidemias*,

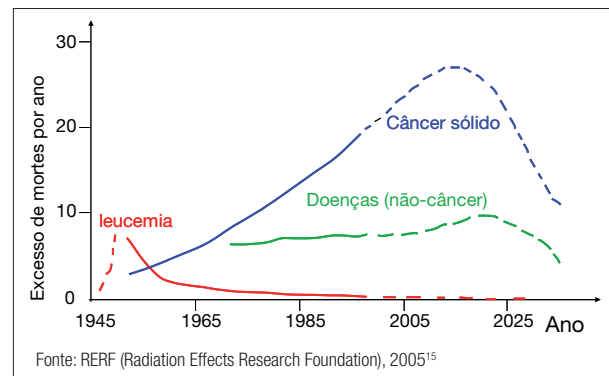


Figura 1. Mortalidade relacionada à radiação ionizante no Estudo do tempo de vida (life span study) com os sobreviventes das bombas atômicas acompanhados de 1950 a 1997.

de padrões de doença tais como quem é portador de uma dada doença e porque tem essa doença, e é o estudo do que ocorre em uma dada população¹²⁻¹⁴.

O grande temor das pessoas com relação a algum tipo de radiação é a indução de câncer, que surge muitos anos após a exposição e que é denominado efeito estocástico. O tempo de latência médio entre a exposição à radiação ionizante e a detecção do excesso de mortes com leucemia em Hiroshima foi de 2 anos e o pico foi alcançado (7 ± 1) anos após a explosão da bomba. Entretanto, no caso de cânceres sólidos, o tempo de latência médio pode ser de mais de 50 anos, como se pode ver na Figura 1. Assim, a correlação entre a exposição à radiação e câncer só pode ser feita através de estudo epidemiológico. Isso porque a epidemiologia se propõe a medir a influência de vários agentes, do estilo de vida, dos hábitos alimentares, da genética e mesmo de medicamentos que devem ser tomados durante toda a vida, na saúde humana e investiga a existência ou não de uma associação entre uma dada doença e um determinado agente.

Desde meados do século 19, a Medicina tenta descobrir a existência de correlação entre o ambiente, o modo de vida, a genética e o surgimento de determinadas doenças. Com o avanço da estatística e dos métodos de diagnóstico e com milhares de participantes honestos é que surgiram os primeiros estudos importantes em epidemiologia. Um estudo epidemiológico prospectivo importantíssimo, ainda em andamento, é o Framingham Heart Study¹⁶ que se iniciou em 1948 e foi coordenado pela Universidade de Harvard e pelo Instituto Nacional de Saúde dos Estados Unidos. Isso porque, no fim da década de 40, a maior causa de morte nos Estados Unidos já eram os distúrbios cardiovasculares e o número de mortes aumentava a cada ano, transformando-se em epidemia. Além disso, pouco se sabia sobre as causas de infarto, por exemplo, e o estudo teve por um

* De acordo com o Novo Dicionário Aurélio, epidemia é uma doença que surge rapidamente em um lugar e acomete simultaneamente grande número de pessoas; a endemia, por sua vez, é uma doença que existe constantemente em determinado lugar e ataca número maior ou menor de indivíduos; a pandemia é uma epidemia generalizada.

dos objetivos a identificação de fatores que contribuem nas doenças cardiovasculares. A maior parte dos cardiologistas acreditava que a aterosclerose, assim como o aumento da pressão arterial, era uma consequência inevitável do envelhecimento. Esse estudo teve por participante quase toda a população de Framingham, cidade-dormitório a 50 km de Boston, Estados Unidos. Eles assumiram o compromisso de se submeterem a repetidos testes e responderem a questionários de tempos em tempos por toda a vida, para determinar os fatores de risco para derrames e infartos. Em 1971, a segunda geração entrou como participante e em 2002, a terceira geração foi recrutada. Os conhecimentos adquiridos durante todos esses anos apontam que os principais fatores de risco cardiovasculares são: pressão arterial alta, nível alto de colesterol, tabagismo, obesidade, *diabetes mellitus* e sedentarismo. Além disso, apontam também que hábitos de vida saudável podem reverter ou retardar doenças cardíacas, e que há relação entre vírus e bactérias e incidência de doenças cardiovasculares. Outras informações importantes sobre a demência, osteoporose, artrite, diabetes e câncer também foram obtidas. Atualmente os pesquisadores estão com a atenção voltada aos genes responsáveis pelo metabolismo do colesterol e o papel dos fatores genéticos nas doenças cardiovasculares.

Objetivo da epidemiologia

O principal objetivo da epidemiologia é a determinação de causa e efeito relativos aos agravos à saúde. Tem como meta verificar se os resultados estatísticos indicam a presença de uma verdadeira associação causal e estimar o risco de um dado agente à saúde. Entretanto, um resultado estatisticamente significativo ainda não prova que a associação seja necessariamente de causa e efeito.

Para determinar se um dado agente, também denominado fator de risco (fumo, radiação ionizante, radiação UV, amianto etc.) causa doença, há alguns critérios principais que os epidemiologistas usam: temporalidade, consistência, resposta à dose, plausibilidade etc.

- **Temporalidade:** significa que a exposição deve preceder a ocorrência de doença. Uma pessoa, ao descobrir que está com câncer de pulmão, fica nervosa e começa a fumar. Nesse caso, o fumo não é a causa do câncer. Entretanto, em muitos estudos, os epidemiologistas coletam informações após ambas as ocorrências: exposição e doença, esquecendo-se da temporalidade.
- **Consistência:** significa que o mesmo tipo de efeito é verificado por pesquisadores de diferentes localidades. A relação entre fumo e câncer de pulmão foi estudada de 1950 a 1990 por diferentes autores na população feminina e masculina separadamente, e em raças diferentes, e todos chegaram à conclusão de que o fumo é agente carcinogênico, causador de câncer pulmonar.
- **Resposta à dose:** significa que quanto maior a dose, maior é o efeito. No caso do fumo foi também demonstrado que quem fuma mais tem maior risco de ter câncer do pulmão.

- **Plausibilidade:** se houver uma explicação científica plausível sobre o processo de interação que causa câncer, como a ionização, maior é a credibilidade na associação causal entre a doença e aquele agente. No que se refere às micro-ondas de telefonia celular, até hoje não há conhecimento científico plausível quanto ao processo de indução de câncer. Essas ondas não possuem energia suficiente para ionizar, que é o primeiro estágio do dano na molécula de DNA que pode resultar em câncer.

Principais tipos de estudos epidemiológicos

A seguir descreveremos resumidamente dois dos principais tipos de estudos epidemiológicos.

Estudo caso-controle

Esse estudo responde à pergunta: por que eu? Por que aconteceu comigo? Por que certas pessoas ficam doentes (casos) e por que outras não (controle)? O estudo caso-controle é em geral retrospectivo, desde que a história de exposição a um agente no passado seja avaliada. Uma vez que os objetivos do estudo são definidos, começa-se a identificação dos casos (doentes) e dos respectivos controles (não doentes). Tradicionalmente a comparação é expressa em termos de proporção de casos *versus* proporção de controles, ambos mostrando uma característica particular. Ou seja, trata-se de verificar a possibilidade de diferenças nas proporções de indivíduos expostos entre os doentes e entre os não doentes. Se encontrar uma frequência maior de indivíduos expostos entre os casos do que entre os de controle, pode-se deduzir que há uma associação entre a doença e o agente ao qual as pessoas estudadas estiveram expostas.

Nesse tipo de estudo determina-se o odds (chance, probabilidade), que é uma razão de probabilidades. O Odds Ratio (OR), também chamado razão de produto cruzado, é uma razão entre odds, ou uma razão entre as razões de probabilidades e é associado à probabilidade de exposição. A partir dos dados da Tabela 1, podemos escrever a Equação 1, através da qual se determina a Odds Ratio.

$$\text{Odds Ratio} = \frac{\frac{a}{c}}{\frac{b}{d}} = \frac{ad}{bc} = \frac{\text{fator de exposição de casos}}{\text{fator de exposição de controle}} \quad (1)$$

O Odds Ratio é uma grandeza adimensional; se OR=1, significa que não há associação entre o agente em questão e o evento; se OR>1, significa que a associação é positiva e que quem é doente provavelmente esteve exposto ou mais exposto a um dado agente do que quem não é doente; e se OR<1, a associação é negativa e o agente tem um papel protetor.

Estudo coorte

O estudo coorte seleciona indivíduos baseados em nível de exposição, sendo que nenhum deles está doente quando se inicia o estudo. É um estudo longo, diferente

do caso-controle, que é bem mais curto. Em geral é um estudo prospectivo que acompanha a partir de uma data, durante muitos anos, um grupo de pessoas que sabidamente estiveram expostas ao fator suspeito em diferentes níveis, ou um grupo exposto e outro não exposto ou menos exposto. À medida que se prossegue o estudo, o pesquisador vai contabilizando o aparecimento da doença. Um exemplo é a verificação do surgimento de casos de leucemia em crianças que estiveram expostas à radiação ionizante ainda no útero.

Os dados coletados consistem de informação sobre o grau de exposição dos indivíduos e o aparecimento e desenvolvimento de uma dada doença. Esses dados são tabulados conforme a Tabela 2.

A taxa de incidência entre os expostos é $a/(a+b)=I_e$ e a taxa entre os não expostos é $c/(c+d)=I_o$. O epidemiologista está interessado em determinar se a taxa de incidência entre os expostos é maior que a taxa entre os não expostos, ou seja, se $a/(a+b) > c/(c+d)$. Se isso ocorrer é porque há uma associação entre o agente ao qual essas pessoas estiveram expostas e o subsequente aparecimento da doença. A pergunta seguinte é quão forte é essa associação. Para responder a essa pergunta, calcula-se o Risco Relativo ou o Risco Proporcional (RR), que é uma medida da intensidade de associação em um caso observacional. Portanto, o Risco Relativo pode ser calculado, dividindo a taxa de incidência de uma dada doença entre indivíduos expostos, I_e pela taxa de incidência dessa mesma doença entre indivíduos não expostos, I_o , através da Equação 2.

$$RR = \frac{I_e}{I_o} = \frac{\frac{a}{a+b}}{\frac{c}{c+d}} \quad (2)$$

O RR é uma grandeza adimensional; se o $RR=1$, não há associação entre a presença de um agente e o evento; se $RR > 1$, a associação é positiva e a presença desse agente se associa a uma maior ocorrência de evento; e se $RR < 1$, a associação é negativa.

O RR é útil porque nos diz quantos casos extras de incidência da doença são esperados em uma população específica nos próximos anos, sabendo-se a exposição e o fator de risco correspondente. Calculam-se também a variância, os limites de confiabilidade e realizam-se os testes estatísticos. A interpretação dos valores de RR está na Tabela 3.

Mesmo que o RR esteja entre 1 e 3, na categoria de associação muito fraca ou fraca, se a quantidade de indivíduos envolvidos for grande, a pesquisa epidemiológica torna-se importante.

O OR e o RR são equivalentes no caso de doenças relativamente raras, o que é verdade para muitas doenças crônicas que acometem menos do que 1 a 5% da população em observação durante vários anos, que é o caso de câncer.

Podemos definir ainda o Risco Absoluto (AR), que é a probabilidade, comumente medida em porcentagem, de uma pessoa desenvolver uma doença ou morrer, em certo

Tabela 1. Caracterização do banco de dados para estudo epidemiológico do tipo caso-controle.

Exposição	Número de doentes (casos)	Número de pessoas sem a doença (controle)
Expostos	a	b
Não expostos	c	d
Total	a + c	b + d

Tabela 2. Caracterização do banco de dados para estudo epidemiológico do tipo coorte.

Característica etiológica ou exposição	Ficaram doentes	Não ficaram doentes	Total
Presente (expostos)	a	b	a + b
Ausente (não expostos)	c	d	c + d

Tabela 3. Interpretação do Risco Relativo

Risco Relativo (RR)	Interpretação
>3	Associação forte
Entre 2 e 3	Associação fraca
Entre 1 e 2	Associação muito fraca
1	Não há associação
<1	Associação negativa (efeito protetor)

intervalo de tempo. O AR é importante para estimar a porcentagem de uma população que é a de risco com relação a um dado agente.

A publicação da ICRP³ emprega ainda as grandezas Excesso de Risco Relativo (ERR), sendo $ERR=1-RR$, e Excesso de Risco Absoluto (EAR), sendo $EAR=1-AR$, e o Coeficiente de Risco Nominal medido em Sv^{-1} , que é a estimativa de risco para efeitos estocásticos, isto é, câncer e efeitos hereditários.

Qualquer estudo epidemiológico devido a doses baixas deve ser feito com um número muito grande de indivíduos. Comumente, o estudo é feito com centenas de indivíduos, ou, na melhor das hipóteses, com alguns milhares, de modo que a estatística pode não ser confiável.

Na história da epidemiologia, somente cerca de uma dúzia de agentes ambientais têm sido repetida e fortemente ligados ao câncer humano. Entre eles podemos citar o fumo, o álcool, a radiação ionizante, a ocupação ligada a asbestos, o vírus da hepatite B, o vírus HTLV-1 da leucemia de célula T humana e o papilomavírus humano (HPV).

A determinação da relação entre exposição à radiação ionizante e incidência de câncer nos sobreviventes das bombas atômicas é feita através de estudo epidemiológico do tipo coorte. Esse estudo vem fornecendo as informações mais confiáveis e acumulando dados desde 1947.

Atomic Bomb Casualty Commission e Radiation Effects Research Foundation

Dois anos após a explosão das bombas atômicas no Japão, em 1947, a Atomic Bomb Casualty Commission

(ABCC) se estabeleceu em Hiroshima e no ano seguinte em Nagasaki, sob os auspícios da United States National Academy of Sciences para começar os estudos epidemiológicos de longa duração de efeitos das radiações ionizantes nos sobreviventes das duas cidades¹⁷. Era um trabalho de colaboração entre Estados Unidos e Japão. Em 1975, a ABCC foi substituída pela Radiation Effects Research Foundation (RERF)¹⁵, que é uma fundação japonesa sem fins lucrativos, administrada com fundos iguais dos governos do Japão e dos Estados Unidos. A RERF vem desenvolvendo uma série de pesquisas desde então, sendo seus principais temas: estudo do tempo de duração da

vida (Life Span Study - LSS), Estudo da saúde de adultos, estudo de patologias e Estudo de mortalidade, entre outros. Um documento publicado em 2008 pela RERF diz que, embora já se passaram mais de 60 anos, ainda serão necessários mais 40 anos para completar o estudo epidemiológico dos efeitos das radiações nos sobreviventes.

A pesquisa sobre LSS acompanhou e continua acompanhando mais de 200.000 sobreviventes das explosões das bombas de Hiroshima e Nagasaki e seus descendentes. O principal objetivo da pesquisa é correlacionar a mortalidade e a incidência de câncer induzido pela radiação ionizante com o grau de exposição. Esse estudo epidemiológico é o mais importante do mundo pelo tamanho da população considerada, duração da pesquisa e dados minuciosamente registrados ano após ano. Vários resultados importantes continuam sendo obtidos e eles são usados para estimar o grau de risco da radiação ionizante na saúde humana. A Figura 2 mostra o RR normalizado para a incidência de câncer em diferentes órgãos, induzido por uma dose de 1 Gy recebida aos 30 anos e detectado aos 70 anos¹⁸.

Um outro resultado novíssimo de epidemiologia foi obtido com o Estudo da saúde de adultos de 1958 a 1998. Ele se refere a um aumento na incidência de outras doenças que não câncer entre os sobreviventes da explosão das bombas no Japão que receberam dose absorvida de 1 Gy. A Figura 3 mostra o RR para a incidência de várias doenças que não câncer devido à radiação ionizante.

A Figura 4, por sua vez, mostra o RR para a mortalidade que resulta de outras doenças que não câncer entre os sobreviventes das bombas no Japão, obtido através do Estudo LSS e do Estudo da saúde do adulto, principalmente quando a exposição ocorreu em tenra idade. O aumento de mortalidade é estatisticamente significativo para todas as doenças que não cânceres, especialmente doenças cardiorrespiratórias, derrames e doenças digestivas em pessoas que receberam dose absorvida de 1 Gy. Atualmente, são estudados os possíveis mecanismos biológicos relacionados com a aterosclerose, causada pela radiação ionizante. Os efeitos tardios em pessoas que se submeteram a radioterapia na região do tórax também estão sendo coletados e acumulados para fins de comparação. Esses dados serão muito importantes porque em radioterapia as doses são bem conhecidas.

Dificuldades inerentes aos estudos epidemiológicos

Há várias dificuldades em estudos epidemiológicos: os vieses, o tamanho da população a considerar, a determinação da 'dose' a que a população é exposta, a influência do sexo, da idade das pessoas, entre outros.

Os vieses são outros fatores ou agentes que podem influenciar na determinação de risco e que não foram considerados²¹. No que se refere ao tamanho da população, ele deve ser tanto maior quanto menor for a dose (ou o efeito), e muitas vezes não é fácil encontrar a população de controle que não é exposta ou pouco exposta a um dado agente, como é o caso de exposição a micro-ondas

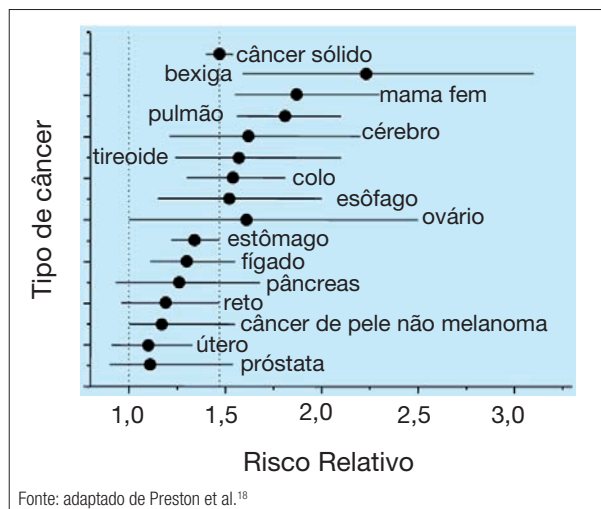


Figura 2. Risco Relativo para a incidência de câncer obtido com o estudo epidemiológico sobre tempo de duração de vida entre os sobreviventes das bombas no Japão. As linhas horizontais indicam intervalo de confiança de 90%.

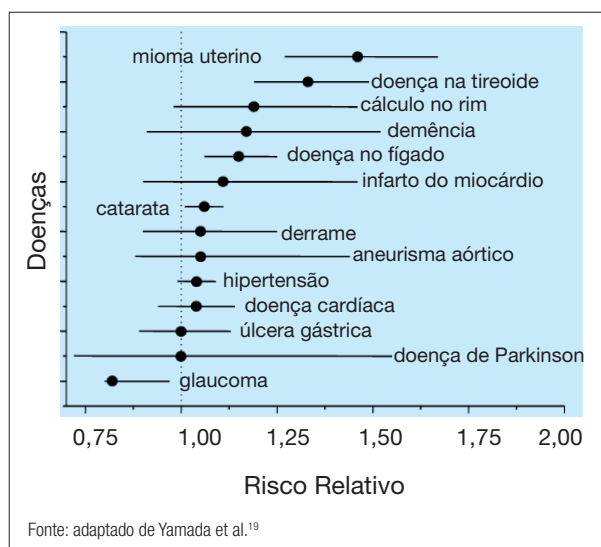


Figura 3. Risco Relativo para a incidência de outras doenças que não câncer entre os 10.000 sobreviventes das bombas em Hiroshima e Nagasaki que receberam dose de 1 Gy obtido através do estudo da saúde de adultos de 1958 a 1998. As linhas horizontais indicam intervalo de confiança de 95%.

de telefonia celular. No caso da radiação ionizante, o tamanho da população necessário para detectar excesso de risco associado com probabilidade de 80% com nível de significância de 5% é estimado como sendo de 61,8 milhões de indivíduos para dose de 1 mGy, de 620 mil para dose de 10 mGy e de 6.390 para dose de 100 mGy etc., segundo a ICRP Publicação 99²².

Uma das maiores dificuldades é a estimativa de dose recebida pelas pessoas do público que não usavam dosímetros e que foram expostas à radiação. No caso dos campos magnéticos de 60 Hz, o estudo epidemiológico correlacionando câncer infantil começou com Nancy Wertheimer e Ed Leeper em 1979²³, que consideraram a configuração dos fios elétricos nas casas em Denver para especificar a dose. O acidente de Chernobyl expôs à radiação ionizante tanto externa quanto internamente a maior população na história de acidentes até hoje, mas não há como determinar a dose recebida individualmente. As cidades europeias foram contaminadas de forma muito diferente, dependendo da meteorologia na ocasião, como a direção do vento que levou a poeira radioativa e as chuvas localizadas.

A primeira tentativa para estimar as doses recebidas pelos sobreviventes das bombas atômicas explodidas no Japão foi iniciada em 1957 pelos pesquisadores da Oak Ridge National Laboratory, cujo sistema de dosimetria recebeu o nome de T57D^{15,24,25}. As cidades foram divididas em regiões por meio de círculos concêntricos com raios de 500 m, 1.000 m, 1.500 m etc., tendo como centro o hipocentro, que é o ponto em que uma linha perpendicular traçada do local da explosão da bomba atinge o solo. A dose individual seria estimada coletivamente por faixas, através de informação do próprio sobrevivente sobre sua posição na hora da explosão, se estava entre 500 e 1.000 m, por exemplo, do hipocentro. Para isso, explodiram bombas no deserto de Nevada, principalmente para avaliar o grau de blindagem da radiação pelas residências e prédios, e também para avaliar os campos de radiação que resultaram da explosão. Para tal, construíram residências similares àquelas japonesas, com paredes de madeira, com fantasmas portando dosímetros no interior delas, e as colocaram nas proximidades dos locais das explosões. Foram feitas as dosimetrias de radiação gama e de nêutrons. Sendo esse sistema bastante rudimentar, ele foi substituído posteriormente pelo sistema dosimétrico T65D^{15,24,25} realizado pelos pesquisadores da Oak Ridge National Laboratory em colaboração com os do Los Alamos National Laboratory. Ambos eram ainda métodos tentativos e empíricos baseados em medidas nucleares e continham muitas dúvidas quanto à altura e ao hipocentro da explosão das bombas, além de incoerências encontradas entre os resultados previstos e medidos e de efeitos entre os sobreviventes de Hiroshima e Nagasaki. Com o avanço na tecnologia de computação, decidiram levar avante um novo sistema dosimétrico, agora em colaboração entre Estados Unidos e Japão, que foi denominado DS86^{24,25}. As doses absorvidas (Gy) estimadas em Hiroshima pelo T65D e DS86 a 1.485 m

do hipocentro podem ser vistas na Tabela 4. Nota-se que a dose devida a nêutrons no DS86 em relação a T65D abaixou de um fator ao redor de 10, mas a devida à radiação gama aumentou entre 1,5 e 2,0. Em ambos os sistemas, a blindagem diminuiu de 2,5 a 3,0 vezes a dose devida a nêutrons, e a devida à radiação gama, de 1,1 a 1,7 em um indivíduo por ter estado em ambiente interno em vez de a céu aberto. O excesso de cânceres sólidos, por outro lado, havia dobrado em estatística de 1985 em relação a de 1975. O excesso de morte com câncer entre os sobreviventes acompanhados de 1950 a 1985 foi estimado como sendo de: $13,1 \times 10^{-4}$ (pessoa·ano·Gy).

Esses dados foram muito importantes quando a ICRP decidiu atualizar em 1990 as recomendações de ICRP Publicação 26 de 1977⁵. O limite anual recomendado para trabalhadores, para limitar a probabilidade de ocorrência de efeito estocástico que era de 50 mSv/ano, passou a ser de 20 mSv/ano na ICRP Publicação 60 de 1990⁴ – um abaixamento drástico.

Entretanto, os pesquisadores perceberam que o DS86 ainda tinha algumas falhas à medida que começou a ser usado. Para distâncias maiores que 1,5 km do hipocentro

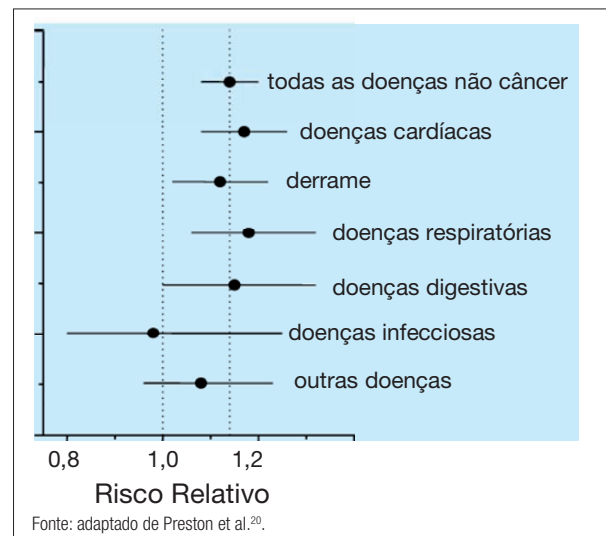


Figura 4. Risco Relativo de mortalidade devido a outras doenças que não câncer. As linhas horizontais indicam intervalo de confiança de 90%.

Tabela 4. Estimativa de dose (mGy) em Hiroshima feita pelo T65D e DS86 a 1.485 m do hipocentro a céu aberto, em ambiente interno e na medula óssea

Local	Nêutron		Gama		Total	
	T65D	DS86	T65D	DS86	T65D	DS86
Céu aberto	120	9,3	240	517	360	526
Ambiente interno	34	3,7	210	308	244	312
Medula óssea	9,5	1,1	130	244	140	245

Fonte: adaptado de Kaul DC²⁴

em Hiroshima, a quantidade de nêutrons calculada não estava de acordo com valores medidos. Surge assim, em 2002, um novo sistema de dosimetria denominado DS02^{15,25}. Foram efetuadas simulações computacionais para melhor determinar o local de explosão da bomba, o tipo e a quantidade de radiação liberada, seu transporte no ar e sua atenuação através de diversos meios. Os dados assim obtidos foram validados com medidas experimentais de termoluminescência, e de ativação de elementos por nêutrons térmicos e rápidos em diversos laboratórios especializados do mundo.

Com DS02^{15,25} muitas dúvidas foram sanadas, e as doses individuais estimadas não ficaram muito diferentes daquelas obtidas com DS86. Entretanto, as doses nas pessoas continuam tendo uma incerteza inerente de cerca de 35% por várias razões: possível imprecisão na informação reportada pelos sobreviventes de onde e como estavam no exato momento da explosão além do valor do rendimento da bomba e das características da radiação emitida que só são conhecidos através de estimativas.

Há ainda um outro fator que dificulta a obtenção do coeficiente de risco: as doses e as taxas de dose nos sobreviventes das bombas são muito mais altas que aquelas as quais estamos expostos no nosso dia-a-dia. Assim, foram desenvolvidos modelos para poder extrapolar os riscos de doses baixas e taxas de dose baixa (RDTDB) a partir dos riscos de doses altas e taxas de dose alta (RDTDA). Introduziram o que se chamou DDREF (dose and dose rate effectiveness factor) que é um número que deve ser usado para dividir o RDTDA para se estimar o RDTDB. Ele é obtido dividindo o coeficiente angular da reta que ajusta os dados de efeitos versus dose alta, usando o modelo linear sem limiar, pelo coeficiente angular da reta que ajusta a região de dose baixa. Os valores de DDREF obtidos variam muito de 2 a 10, dependendo do tipo de tumor e do modelo usado para correlacionar o efeito (morte ou incidência de câncer) versus dose. A ICRP Publicação 103³ recomenda o uso do valor 2,0 para DDREF e reconhece que há muitas incertezas.

O estado da arte

A seguir transcrevemos as recomendações em vigor elaboradas pelas comissões internacionais para as radiações ionizantes, radiação ultravioleta, campos elétricos e magnéticos estáticos e de 60 Hz e campos eletromagnéticos de radiofrequência, com comentários. A forma para o estabelecimento de limites de exposição tanto para

radiações ionizantes quanto para as não ionizantes tem certa similaridade. As grandezas usadas para limitação primária não são mensuráveis e se relacionam com os efeitos biológicos no corpo humano. Para saber se a recomendação está sendo cumprida, outras grandezas mensuráveis necessitam ser introduzidas. Os limites de dose, que já chegaram a ser chamados limites máximos permitíveis, de uma forma geral, são inicialmente estabelecidos para indivíduos ocupacionalmente expostos. O valor da limitação para público é obtido, geralmente, dividindo-se o valor ocupacional por um fator 20 ou 10 ou 5, dependendo do caso. As recomendações levam em conta somente os efeitos comprovados e os efeitos tardios e agudos ou somente os agudos.

Radiações ionizantes: recomendações da ICRP

Publicação 103

A ICRP introduziu o conceito de detrimento, em vez de morte ou incidência de câncer, como medida de dano total à saúde experimentado por um grupo de pessoas e seus descendentes devido à exposição à radiação, à medida que vários tipos de câncer começaram a apresentar curas. Esse conceito leva em conta o fato de um indivíduo ser acometido por um câncer fatal, ponderado pela probabilidade de ter um câncer não fatal e pela probabilidade de ter graves efeitos hereditários além de anos de vida perdidos.

O risco de detrimento ou risco fatal (de morte) R de indivíduos expostos à radiação com dose efetiva E (Sv) pode ser calculado através da Equação 3:

$$R = f \times E \quad (3)$$

onde:

f (Sv⁻¹) é o fator de risco ou coeficiente de probabilidade de risco nominal expresso em número de casos ocorridos por unidade de dose.

Os coeficientes f de probabilidade de risco nominal para efeitos estocásticos ajustados ao detrimento e usados pela ICRP de 1990⁴ e de 2007³ estão na Tabela 5. É importante observar que quase não houve alteração nos coeficientes para câncer, mas para efeitos hereditários os novos coeficientes abaixaram muito. Isso porque, por ora, não encontraram evidência de aumento de danos genéticos nos descendentes dos sobreviventes das bombas atômicas no Japão.

Uma vez conhecidos os coeficientes de risco nominal, e decidindo um valor de risco R que seria considerado aceitável, pode-se calcular o valor de dose efetiva para limitar os efeitos estocásticos.

Tabela 5. Coeficientes de risco nominal para efeitos estocásticos ajustados ao detrimento (10⁻² Sv⁻¹)

População exposta	Câncer fatal + não fatal		Efeitos hereditários		Total	Total
	ICRP 2007	ICRP 1990	ICRP 2007	ICRP 1990	ICRP 2007	ICRP 1990
População toda	5,5	5,0 + 1,0	0,2	1,3	5,7	7,3
Trabalhador adulto	4,1	4,0 + 0,8	0,1	0,8	4,2	5,6

Fonte: publicação ICRP 60⁴ e ICRP 103³.

Fazendo o caminho inverso, isto é, usando o limite recomendado de dose efetiva anual de 20 mSv para trabalhador, podemos então calcular o risco adotado: $R = (4,1 \times 10^{-2}/\text{Sv})(20 \text{ mSv/ano}) = 82/100.000$ (mortes/ano).

As recomendações sobre os limites de dose da ICRP Publicação 103³ em vigor estão na Tabela 6.

Tanto a dose efetiva quanto a dose equivalente no tecido não são grandezas mensuráveis, e outras grandezas, denominadas grandezas operacionais que são correlacionadas com as doses medidas pelos monitores individuais e com a dose efetiva foram introduzidas. As recomendações são específicas para trabalhadores, denominados pela norma da CNEN, NN-3.01 - indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE), e para público em geral. Para o estabelecimento das recomendações, foram considerados tanto os efeitos agudos quanto os tardios.

Radiação ultravioleta (radiação não ionizante): recomendações da ICNIRP

A exposição à radiação ultravioleta (RUV) que causa eritema (queimadura) da pele começou sendo avaliada em termos da grandeza física MED (minimal erythema dose), que não é mensurável. O valor de 1 MED foi avaliado como correspondendo à exposição radiante de 200 J/m² de RUV com comprimento de onda de 300 nm que causa avermelhamento apenas perceptível em uma pele sensível, 24 horas após a exposição. Essa grandeza física não é adequada porque depende fortemente do tipo de pele e do local da pele. Dessa forma introduziram uma nova grandeza que levou em conta o espectro de ação da RUV que causa eritema, que foi denominada SED (standard erythema dose), sendo o valor de 1 SED equivalente a 100 J/m².

Os limites de exposição à RUV são estabelecidos em termos da grandeza física irradiância E (W/m²) para exposição contínua e, em termos de exposição radiante, H (J/m²) para exposição limitada no tempo ou a feixe pulsado²⁶. Essas grandezas correspondem às grandezas operacionais das radiações ionizantes. A recomendação é para limitar a exposição da pele e dos olhos, já que a profundidade de penetração da radiação ultravioleta é pequena. A recomendação é a mesma para indivíduos ocupacionalmente expostos e para o público, e leva em conta só o efeito agudo, que é o eritema e o dano nos olhos, apesar de haver comprovação científica de que a radiação ultravioleta tem ação carcinogênica tardia. Alguns cientistas avaliam que protegendo a pele contra o eritema, está se protegendo contra o câncer de pele.

A Figura 5 mostra as recomendações da ICNIRP⁹ com os limites de exposição no eixo da direita e com a efetividade espectral relativa no eixo da esquerda em função do comprimento de onda da RUV. A efetividade espectral relativa é um fator de peso e é fortemente dependente do comprimento de onda, estando relacionado com a sensibilidade da pele. Como se pode ver pela Figura 5, os limites de exposição à RUV de 180 nm a 400 nm cobrem cerca de 5 décadas, variando fortemente com o

Tabela 6. Limites de dose recomendados pela ICRP Publicação 103

Tipo de limite	Ocupacional	Público
Dose efetiva E	20 mSv/ano, 100 mSv/5 anos, nunca ultrapassar 50 mSv/ano	1 mSv/ano
Dose equivalente H anual no:		
Cristalino	150 mSv	15 mSv
Pele	500 mSv	50 mSv
Mãos e pés	500 mSv	-

Fonte: ICRP Publicação 103³

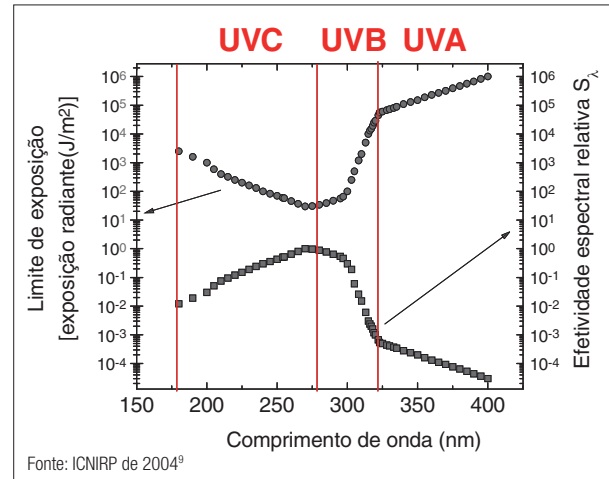


Figura 5. Limites de exposição à radiação ultravioleta e efetividade espectral relativa em função do comprimento de onda recomendados pela ICNIRP de 2004⁹

comprimento de onda. Para verificar o cumprimento da recomendação, há que se medir a exposição radiante com um equipamento muito sofisticado, o espectro-radiômetro com grande resolução, um aparelho de alto custo que deve ser calibrado de tempos em tempos no exterior. Este é um problema muito complicado, porque em quase todos os países a quantidade de equipamento desse tipo é extremamente limitada. Por causa disso, e porque a RUV é carcinogênica, a WHO, em colaboração com vários órgãos, introduziu o que se chamou de Índice UV²⁶, uma grandeza adimensional que reflete os níveis de RUV relevantes aos efeitos biológicos estabelecidos no ser humano. Esse índice, que é associado a cores, pode ser usado e compreendido facilmente pela população. Os boletins meteorológicos divulgam diariamente o valor máximo do Índice UV do dia, que é atingido ao redor do meio dia. De acordo com o valor do Índice UV, recomenda-se o uso de protetores solares, óculos e chapéus e até a permanência em ambientes fechados em alguns horários.

Em junho de 2009, 20 cientistas de 9 países se reuniram na IARC para re-estimar a carcinogenicidade de vários tipos de radiação, e informaram que as conclusões serão publicadas como parte D do volume 100 de suas monografias. Nesse ínterim, publicaram um artigo na

Lancet Oncology²⁷. Nele, reafirmam que mantiveram no grupo 1 – comprovadamente carcinogênico – as partículas alfa, beta, nêutrons, raios X, raios gama e a radiação solar. Agora, incluíram também no grupo 1 a radiação ultravioleta com comprimentos de onda de 100 nm a 400 nm. Essa faixa compreende as radiações UVC, UVB e UVA, que na monografia anterior da IARC, de 1992²⁷, constava no grupo 2A, de agente provavelmente carcinogênico. Informam ainda, nesse artigo, que uma meta-análise, que combina resultados de vários estudos epidemiológicos, mostrou que o risco de melanoma maligno na pele aumenta 75% quando uma pessoa se submete ao bronzamento artificial antes dos 30 anos. Lembramos que entre os cânceres de pele do tipo não-melanoma, a saber, carcinomas espinocelular e basocelular, e melanoma maligno a incidência deste é de somente 4% entre todos os tipos de câncer de pele, porém com mortalidade altíssima, de 25%²⁶. Os autores relatam ainda vários estudos epidemiológicos do tipo caso-controle que forneceram evidências de uma associação positiva entre o bronzamento artificial e melanoma ocular. Estudos com animais confirmaram esses resultados. Assim, o grupo de trabalho classificou o aparelho de bronzamento artificial como sendo comprovadamente carcinogênico, incluindo-o no grupo 1.

Os aparelhos de bronzamento artificial estão hoje espalhados pelo país por existir uma cultura de pele bronzada como sinal de beleza e de saúde. Apesar de todos os anos, no início do verão, os dermatologistas fazerem propaganda extensiva sobre os perigos do bronzamento artificial, trata-se de uma cultura difícil de ser mudada. Esperamos que, com essa conclusão da IARC, os órgãos responsáveis tomem atitudes mais drásticas. Além disso, há o passo seguinte da ICNIRP, que deve elaborar recomendações a respeito.

Campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos (radiação não ionizante): recomendações da ICNIRP

Antes de 1998 havia uma grande quantidade de guias, com cada país e/ou cada entidade emitindo a sua recomendação para faixas diferentes de campos eletromagnéticos,

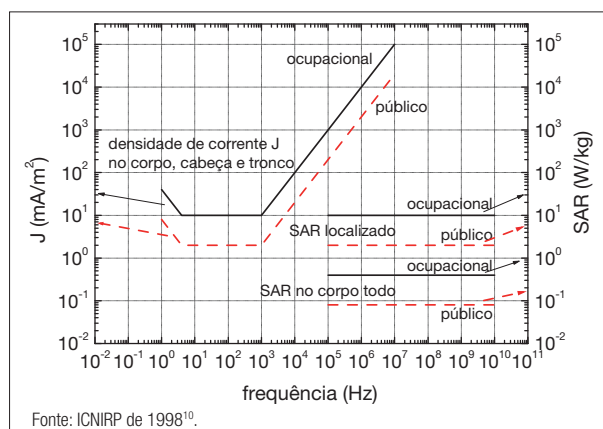


Figura 6. Restrições básicas em função da frequência para trabalhador e para público em geral.

com valores diferentes, para pessoas ocupacionalmente expostas e para o público, ou para ambientes diferentes. Lembramos ainda que os limites de exposição a microondas no leste europeu eram ao redor de 1.000 vezes inferior aos do ocidente. Em 1998, a ICNIRP, numa tentativa de harmonizar e uniformizar os guias, publicou uma recomendação¹⁰ que ainda está em vigor. Nela, o intervalo de frequência da onda eletromagnética considerado foi de 0 a 300 GHz, que devido ao tipo de interação que ocorre com o corpo humano, foi dividido em duas grandes faixas: a que vai de 0 Hz a 10 MHz e de 10 MHz a 300 GHz. Introduziram grandezas físicas relacionadas aos efeitos biológicos, e que também não são mensuráveis e usadas para o estabelecimento de restrições básicas. Na primeira faixa, a grandeza física recomendada foi a densidade de corrente induzida no corpo J (A/m^2) com a finalidade de evitar a ocorrência de estímulo elétrico nos músculos e nervos e assim proteger o cérebro e o coração. Na segunda faixa, a nova grandeza física introduzida foi SAR – taxa específica de absorção ou dissipação de energia, com unidade em W/kg , também não mensurável, para evitar aquecimento do corpo. Para o estabelecimento de limite, partiu-se do conhecimento de que uma exposição a campos eletromagnéticos na faixa de 10 MHz a alguns GHz do corpo todo à SAR de $4 W/kg$ durante 30 minutos pode elevar a temperatura do corpo de $1^\circ C$. Usando um fator 10, limitou a SAR ocupacional entre 100 kHz e 10 GHz a $0,4 W/kg$, e do público a $0,08 W/kg$. Como se pode ver, os efeitos biológicos considerados foram somente os comprovados cientificamente, que são os agudos de curto prazo, mas não os estocásticos (câncer e efeitos hereditários), que são os mais temidos pela população. Para verificar o cumprimento das recomendações, introduziram-se as grandezas físicas mensuráveis, a saber: campo elétrico E (V/m), campo magnético H (A/m), densidade de fluxo magnético B (T) e densidade de potência S (W/m^2). Os valores de limitação com essas grandezas foram chamados níveis de referência.

As Figuras 6 e 7 mostram respectivamente as restrições básicas e os níveis de referência da ICNIRP de 1998¹⁰ para trabalhador e para público em função da frequência da onda eletromagnética.

Os valores mínimos dos níveis de referência são devidos ao fato de que, nessa faixa de frequência da onda eletromagnética, o corpo ou regiões do corpo entram em ressonância. Como se pode perceber os limites abrangem muitas décadas.

Campos elétricos e magnéticos estáticos e com frequência de 60 Hz

Em 2002, a IARC¹¹ publicou uma monografia sobre a avaliação de riscos carcinogênicos em seres humanos expostos a campos elétricos e magnéticos estáticos e com frequência extremamente baixa. Nela, classificou os campos elétricos e magnéticos estáticos e os campos elétricos de frequência extremamente baixa no grupo 3, de agentes não carcinogênicos, e o campo magnético

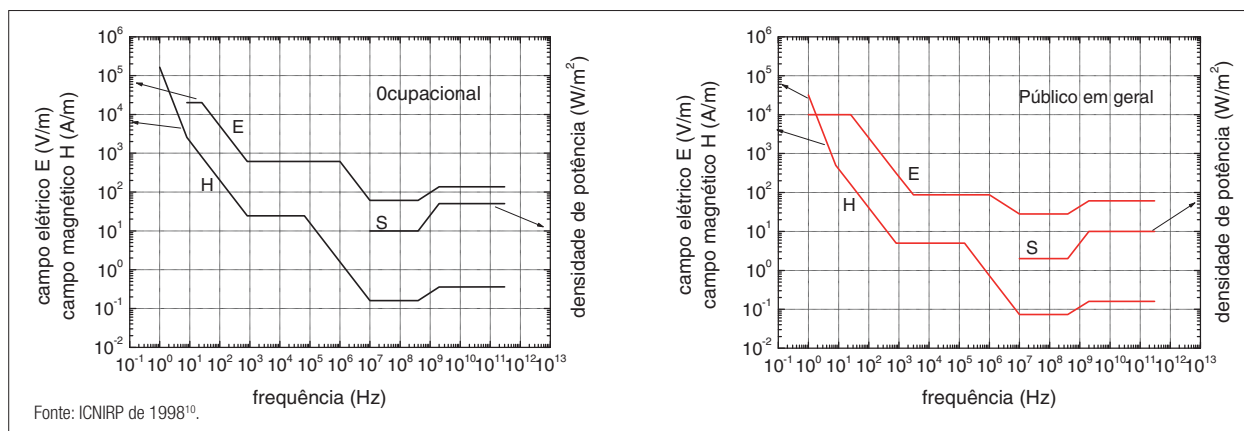


Figura 7. Níveis de referência em função da frequência para trabalhador e para público em geral.

com frequência extremamente baixa, na qual inclui o de 60 Hz, no grupo 2B de agente possivelmente carcinogênico para seres humanos. Na monografia, justificam que desde a primeira publicação, associando leucemia infantil a campos elétricos e magnéticos nas proximidades das linhas de transmissão de energia elétrica em 1979 por N. Wertheimer e E. Leeper²³, muitos trabalhos têm sido publicados sobre o tema, alguns confirmando a associação com campos magnéticos.

Em 2006, a WHO publicou o Environmental Health Criteria²⁸ sobre campos elétricos e magnéticos estáticos, e em 2009 a ICNIRP²⁹ publicou as recomendações para limitar a exposição a campos magnéticos estáticos. Explicitam que as recomendações se basearam em efeitos biológicos diretos e que valores acima dos limites podem causar vertigem, náusea e magnetofosfenos (pontos brilhantes nos olhos). Além disso, consideraram a necessidade de proteger os indivíduos do público com dispositivos médicos implantados que podem apresentar mau funcionamento por sofrerem interferência, e com implantes contendo material ferromagnético. Os limites de exposição a campos magnéticos estáticos recomendados pela ICNIRP²⁹ estão na Tabela 7.

Nas recomendações da ICNIRP de 1998¹⁰, quanto a campos elétricos e magnéticos de 60 Hz, foram considerados somente os efeitos agudos que podem acometer o sistema nervoso.

Em 2007, a WHO, juntamente com a ILO e a ICNIRP, publicou o Environmental Health Criteria 238³⁰ sobre campos com frequência extremamente baixa. Algumas publicações recentes indicavam haver evidências científicas epidemiológicas de que a exposição crônica a campos magnéticos com frequência de 60 Hz, com intensidade muito baixa, poderia causar leucemia infantil. Entretanto, essa evidência ainda está sujeita a muitas incertezas e por isso esses campos foram colocados na categoria 2B. Várias outras doenças também têm sido analisadas: outros tipos de câncer infantil, câncer em adultos, depressão, suicídio, alteração imunológica, doenças neurológicas e cardiovasculares, entre outros, podendo-se afirmar

Tabela 7. Limites de exposição a campos magnéticos estáticos

Características de exposição	Densidade de fluxo magnético B
Ocupacional	
Exposição da cabeça e do tronco	2 T
Exposição dos membros	8 T
Público em geral	
Exposição de qualquer parte do corpo	400 mT

Fonte: Publicação ICNIRP²⁹

com segurança que não há associação entre essas doenças e campos magnéticos de 60 Hz.

Uma meta-análise que combinou resultados de vários estudos epidemiológicos³¹ para exposições com densidade de fluxo magnético B entre 0,1 e 0,2 μ T, 0,2 e 0,4 μ T e $B \geq 0,4 \mu$ T, tendo por referência o valor de $B < 0,1 \mu$ T, mostra haver uma associação entre o campo magnético de 60 Hz e leucemia infantil, principalmente porque o Risco Relativo aumenta com a dose. A Figura 8, retirada do artigo³¹, mostra esse efeito.

As novas recomendações da ICNIRP relativas aos campos magnéticos de 60 Hz devem estar sendo providenciadas, tendo em vista os resultados recentes de diversas pesquisas. Até mesmo porque o nível de referência para densidade de fluxo magnético com frequência de 60 Hz recomendado pela ICNIRP de 1998¹⁰ para o público é de 83 μ T.

Campos eletromagnéticos com frequência alta (radiofrequência e micro-ondas)

As recomendações atualmente em vigor para radiofrequência de 10 kHz a 300 GHz e micro-ondas de 300 MHz a 300 GHz são as da ICNIRP de 1998¹⁰. Desde então muitos artigos foram publicados, e com isso surgiu a necessidade de uma análise e discussão do conjunto para atualização da recomendação, se for o caso. Por isso, um comitê da ICNIRP realizou esse trabalho e acabou de publicar em 2009 um extenso documento de 358 páginas: Exposure to high frequency electromagnetic fields,

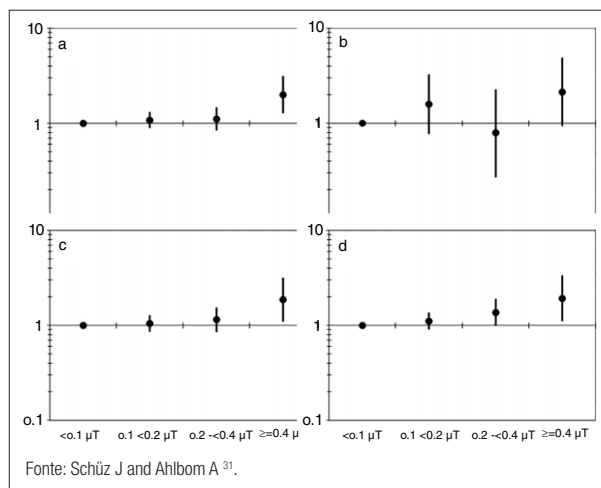


Figura 8. Risco Relativo (no eixo vertical) em função de intervalos de densidade de fluxo magnético obtido com meta-análise. (A) todos os estudos; (B) estudos baseados em campos calculados; (C) estudos baseados em medidas de 24/48 horas; (D) estudos baseados em medidas de exposição noturna.

biological effects and health consequences (100 kHz-300 GHz)³². O documento é composto por três partes, sendo que a primeira discorre sobre dosimetria, a segunda trata de uma revisão dos estudos experimentais sobre efeitos biológicos e a terceira discorre sobre epidemiologia.

Dentro da faixa considerada estão os campos eletromagnéticos com aplicações importantes, como aqueles usados em fornos de micro-ondas e em comunicação em geral, incluindo telefones celulares. Esse trabalho é um preâmbulo para a preparação das novas recomendações. A principal conclusão desse documento é que somente os efeitos térmicos, em que o mecanismo de interação é cientificamente bem conhecido, continuam sendo confirmados. Outros efeitos tardios, principalmente o câncer, continuam sem comprovação, mesmo no caso de crianças que fazem uso constante de celulares durante tempos longos. Escrevem também que há várias dificuldades com relação aos estudos epidemiológicos que possam associar o uso de celulares a tumores cerebrais. Há o fato de que o uso regular de telefones celulares começou a partir de 1990 e o câncer é um efeito a longo prazo; além disso, a tecnologia vem mudando a passos largos, cada ano sendo lançados modelos novos, o que dificulta sobremaneira a avaliação do nível de exposição. Várias outras dificuldades são dignas de serem citadas: a população inicialmente exposta é pequena e os 15 anos de exposição são insuficientes para detectar excesso de incidência de câncer e morte; encontrar uma população de controle que nunca foi exposta ou pouco exposta para comparação; além da incidência de tumores cerebrais na população ser pequena, sendo de 10 a 15 casos a cada 100.000 pessoas por ano.

A principal conclusão desse documento é de que resultados de estudos epidemiológicos até a data da sua publicação não fornecem evidências consistentes e convincentes de uma associação e muito menos de uma

relação causal entre exposição à radiofrequência e qualquer efeito danoso à saúde.

Referências

1. Taylor LS. History of the International Commission on Radiological Units and Measurements (ICRU). *Health Phys.* 1958;1(3):306-16.
2. Taylor LS. History of the International Commission on Radiological Protection (ICRP). *Health Phys.* 2002;82(6):789-94.
3. ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. UK: Elsevier; 2007;37(2-4).
4. ICRP Publication 60. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Oxford: Pergamon Press; 1991;21(1-3).
5. ICRP Publication 26. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Oxford: Pergamon Press; 1977;1(3).
6. Environmental Health Criteria (EHC) 160: Ultraviolet radiation. Geneva: World Health Organization; 1994.
7. International Agency for Research on Cancer (IARC). Solar and ultraviolet radiation. Monographs on the evaluation of carcinogenic risk to humans. Lyon: IARC; 1992. v. 55.
8. International Agency for Research on Cancer, World Health Organization. Sunscreens. IARC handbooks of cancer prevention. Lyon: IARC, WHO; 2001. v. 5.
9. International Commission on Non Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation). *Health Phys.* 2004;87(2):171-86.
10. International Commission on Non Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys.* 1998;74(4):494-522.
11. International Agency for Research on Cancer. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Non-ionizing radiation, Part 1: Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields. Lyon:IARC; 2002. v. 80.
12. Lilienfeld DE, Stolley PD. Foundations of Epidemiology. 3rd ed. N. York. Oxford University Press; 1994.
13. Franco EL. Epidemiology in the study of cancer. In: Bertino JR, editor. Encyclopedia of cancer, v. 1. San Diego:Academic Press; 1997. p. 621-41.
14. Forattini OP. Epidemiologia geral. São Paulo: Edgard Blücher Ltda & Editora da USP; 1976.
15. Radiation Effects Research Foundation [Internet]. A brief description. [cited 2009 Jul 20]. Available from: <http://www.ref.or.jp/shared/briefdescript/briefdescript.pdf>.
16. Framingham Heart Study [Internet]. A Project of National Heart, Lung and Blood Institute and Boston University. [cited 2009 Jul 20]. Available from: <http://www.framinghamheartstudy.org/>.
17. Putnam FW [Internet]. The Atomic Bomb Casualty Commission in retrospect. [cited 2009 Jul 20]. Available from: <http://www.pnas.org/content/95/10/5426.full>.
18. Preston DL, Ron E, Tokuoka S, Funamoto S, Nishi N, Soda M, et al. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958-1998. *Radiat Res.* 2007;168(1):1-64.
19. Yamada M, Lennie WF, Fujiwara S, Akahoshi M, Suzuki G. Noncancer disease incidence in atomic bomb survivors, 1958-1998. *Radiat Res.* 2004;161(6):622-32.
20. Preston DL, Shimizu Y, Pierce DA, Suyama A, Mabuchi K. Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13: Solid cancer and noncancer disease mortality: 1950-1997. *Radiat Res.* 2003;160(4):381-404.

21. Taubes G. Epidemiology faces its limits. *Science*. 14 July 1995;269:164-9.
22. ICRP Publication 99. Low dose extrapolation of radiation-related cancer risk. UK: Elsevier; 2006. v. 35. n. 4.
23. Wertheimer N, Leeper E. Electrical wiring configurations and childhood cancer. *Am J Epidemiol*. 1979;109(3):273-84.
24. Kaul DC. The origin of DS86. In: Peterson LE, Abrahamson S, eds. *Effects of ionizing radiation: atomic bomb survivors and their children (1945-1995)*. Washington, DC: Joseph Henry Press; 1998.
25. Reassessment of the Atomic Bomb Radiation Dosimetry for Hiroshima and Nagasaki [Internet]. *Dosimetry System 2002: DS02*, v. 1, 2005. [cited 2009 Jul 20]. Available from: <http://www.rerf.or.jp/shared/ds02/index.html>.
26. Okuno E. *Radiação ultravioleta: características e efeitos*. São Paulo: SBF, Editora Livraria da Física; 2005.
27. El Ghissassi F, Baan R, Straif K, Grosse Y, Secretan B, Bouvard V, et al. A review of human carcinogens - Part D: radiation. *Lancet Oncol*. 2009;10(8):751-2.
28. World Health Organization. *Environmental Health Criteria 232. Static fields*. Geneva, China: WHO; 2006.
29. International Commission on Non Ionizing Radiation Protection. *Guidelines on Limits of exposure to static magnetic fields*. *Health Phys*. 2009;96(4):504-14.
30. *Environmental Health Criteria 238: Extremely low frequency fields*. The International Labour Organization, The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, The World Health Organization. Spain: WHO Press; 2007.
31. Schüz J, Ahlbom A. Exposure to electromagnetic fields and the risk of childhood leukemia: a review. *Radiat Prot Dosim*. 2008;132(2):202-11.
32. Vecchia P, Matthes R, Ziegelberger G, Lin J, Saunders R, Swerdlow A, editors [Internet]. *Exposure to high frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (100 kHz-300 GHz)*. In: *International Commission on Non Ionizing Radiation Protection 16/2009*. [cited 2009 Jul 31]. Available from: <http://www.icnirp.de/PubEMF.htm>.