



RADIAÇÃO

EFEITOS E FONTES

O que é radiação?
O que a radiação faz a nós?
De onde vem a radiação?

>1 000 mSv

Dose usada em radioterapia

100 mSv

Dose de um astronauta
(4 meses)

10 mSv

TC do abdômen

1 mSv

Dose de trabalhador da indústria
nuclear (1 ano)

0,1 mSv

Radiografia do tórax ou voo
(20 horas)

0,01 mSv

Radiografia odontológica

0,001 mSv

Castanha Brasileira



RADIAÇÃO

EFEITOS E FONTES

O que é radiação?
O que a radiação faz a nós?
De onde vem a radiação?

United Nations Environment Programme

AVISO

Esta publicação é, em grande parte, baseada nas conclusões do Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation - UNSCEAR), órgão subordinado à Assembleia Geral das Nações Unidas e para o qual o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (United Nations Environment Programme - UNEP) assegura seu secretariado. Esta edição não representa necessariamente as opiniões do Comitê Científico ou do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente.

As designações empregadas na apresentação do material não implicam a expressão de qualquer opinião por parte do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente sobre o estatuto jurídico de qualquer país, território, cidade ou área ou de suas autoridades, nem sobre o relacionado à delimitação de suas fronteiras ou limites.

Este trabalho pode ser reproduzido, em parte, e em qualquer formatação, para fins educacionais e não lucrativos, sem permissão especial do detentor dos direitos autorais, desde que seja citada a fonte. A UNEP gostaria de receber uma cópia de qualquer publicação que utilize esta publicação como fonte.

Nenhum uso pode ser feito para revenda ou para qualquer outra finalidade comercial sem prévia autorização por escrito do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente.

O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente promove práticas ambientalmente seguras mundialmente e em suas próprias atividades. Esta publicação foi impressa em papel reciclado, 100 % livre de cloro. O controle da distribuição da UNEP pretende reduzir a emissão de carbono.

Ficha Catográfica: Radiação: efeitos e fontes, Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, 2016

ISBN: 978-92-807-3604-5

Job No.: DEW/2040/NA

Copyright © Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, 2016

Versão eletrônica



RADIAÇÃO

EFEITOS E FONTES

O que é radiação?
O que a radiação faz a nós?
De onde vem a radiação?

United Nations Environment Programme

AGRADECIMENTOS

Esta publicação é em grande parte baseada nas conclusões do Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation - UNSCEAR), e na publicação do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (United Nations Environment Programme - UNEP) “Radiation: doses, effects, risks”, inicialmente editado em 1985, e em 1991 por Geoffrey Lean.

Esta publicação foi originalmente publicada em Inglês. A tradução foi gentilmente apoiado pelo Instituto de Radioproteção e Dosimetria da Comissão Nacional de Energia Nuclear (Brasil). No caso de qualquer discrepância, a língua original rege o texto.

Edição técnica: Malcolm Crick e Ferid Shannoun

Edição de Texto: Susan Cohen-Unger e Ayhan Evrensel

Gráficos e layout: Alexandra Diesner-Kuepfer

Além disso, as seguintes pessoas também fizeram contribuições e comentários valiosos nesta edição:

Laura Anderson, John Cooper, Susan Cueto-Habersack, Emilie van Deventer, Gillian Hirth, David Kinley, Vladislav Klener, Kristine Leysen, Kateřina Navrátilová-Rovenská, Jaya Mohan, Wolfgang-Ulrich Müller, Maria Pérez, Shin Saigusa, Bertrand Thériault, Hiroshi Yasuda e Anthony Wrixon.

PREFÁCIO

Hiroshima, Nagasaki, Three Mile Island, Chernobyl e Fukushima-Daiichi: esses nomes se associaram ao temor do público sobre a radiação, tanto na utilização de armas nucleares, como em acidentes em usinas nucleares. De fato, as pessoas são muito mais expostas diariamente à radiação a partir de muitas outras fontes, incluindo a atmosfera e a Terra, bem como a partir de aplicações em medicina e na indústria.

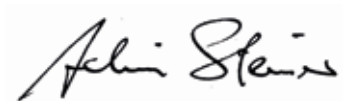


Em 1955, testes com armas nucleares aumentaram a preocupação do público sobre os efeitos da radiação atômica no ar, na água e nos alimentos. Em resposta, a Assembleia Geral das Nações Unidas estabeleceu o Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation - UNSCEAR) para coletar e avaliar informações sobre os níveis e os efeitos da exposição à radiação. O primeiro relatório do Comitê estabeleceu as bases científicas para a negociação do Tratado Parcial de Banimento de Testes em 1963 que proibiu os testes atmosféricos com armas nucleares. Desde então, este Comitê tem continuado a produzir relatórios notáveis sobre exposição à radiação, incluindo os acidentes nas usinas nucleares de Chernobyl e Fukushima-Daiichi. O Comitê tem consistentemente entregue trabalhos de grande valor, tanto para a comunidade científica, quanto para as autoridades reguladoras.

Enquanto a comunidade científica tem publicado informações sobre as fontes de radiação e seus efeitos, estas tendem a ser técnicas e talvez de difícil compreensão para o público em geral – o que pode tornar o assunto muitas vezes confuso, em vez de informativo, o que significa que o receio e a confusão criadas décadas atrás ainda prevalece. Esta publicação tenta abordar o assunto detalhando a informação científica do UNSCEAR mais atualizada - sobre os tipos de radiação, suas fontes e efeitos em humanos e no ambiente - tornando-o acessível ao público em geral.

Hoje o secretariado do UNSCEAR opera sob os conselhos do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (United Nations Environment Programme - UNEP), que ajuda os países a programar políticas e práticas ambientalmente corretas. Ajudar o público a entender a radiação, e como esta afeta a vida no planeta, é uma das principais tarefas do UNEP.

Eu estou muito satisfeito de felicitar todos aqueles que contribuíram para esta publicação, bem como todos os membros do Comitê e suas delegações, que têm trabalhado com muita competência nestas questões críticas nas últimas seis décadas.

A handwritten signature in black ink, reading "Achim Steiner". The signature is written in a cursive style with a horizontal line underlining the name.

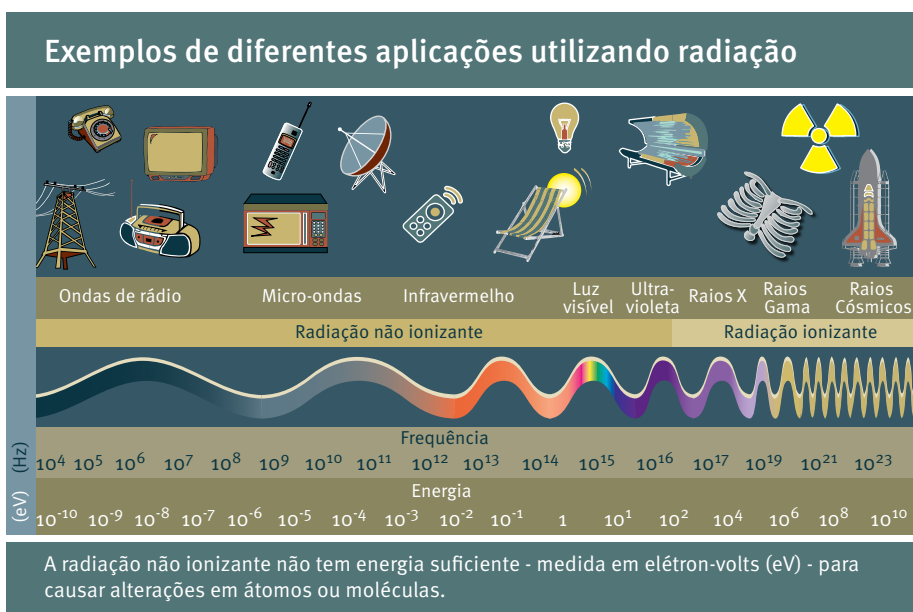
Achim Steiner
Diretor Executivo do UNEP e
Secretário Geral Adjunto das Nações Unidas

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
1. O QUE É RADIAÇÃO?	3
1.1. Um pouco de história	3
1.2. Algumas noções básicas	4
Decaimento radioativo e meia-vida	6
Unidades de radiação	7
1.3. Poder de penetração da radiação	9
2. O QUE A RADIAÇÃO PODE FAZER A NÓS?	11
2.1. Efeitos em humanos	13
Efeitos imediatos à saúde	14
Efeitos tardios à saúde	15
Efeitos à descendência	18
2.2. Efeitos em animais e plantas	22
2.3. Relação entre doses de radiação e efeitos	24
3. DE ONDE VEM A RADIAÇÃO?	27
3.1. Fontes naturais	28
Fontes cósmicas	28
Fontes terrestres	29
Fontes em alimentos e bebidas	32
3.2. Fontes artificiais	32
Aplicações médicas	33
Armas nucleares	37
Reatores nucleares	39
Aplicações industriais e outras	48
3.3. Exposição média à radiação de trabalhadores e público	54

INTRODUÇÃO

Antes de começarmos, nós precisamos distinguir a diferença entre as radiações ionizantes e não ionizantes. A **radiação ionizante** tem energia suficiente para liberar elétrons de um átomo deixando, assim, o átomo carregado; já a radiação **não ionizante** como, por exemplo, ondas de rádio, luz visível, ou radiação ultravioleta, não tem energia suficiente para arrancar os elétrons. Esta publicação é sobre os efeitos da exposição à radiação, tanto proveniente de fontes naturais quanto de fontes artificiais. No entanto, a palavra **radiação** refere-se nesta publicação apenas à radiação ionizante.



Hoje nós sabemos mais sobre as fontes e os efeitos da exposição à radiação em comparação a qualquer outro agente perigoso, e a comunidade científica está em constante análise e atualização deste conhecimento. A maioria das pessoas tem conhecimento do uso da radiação na produção de energia elétrica por usinas nucleares ou em aplicações médicas. No entanto, muitos outros usos de tecnologia nuclear, como na indústria, na agricultura, na construção, na pesquisa e em outras áreas são pouco conhecidos. Alguém que está lendo sobre o assunto pela primeira vez pode ser surpreendido ao saber que as fontes de radiação que causam as maiores exposições não são necessariamente aquelas que atraem a maior atenção. De fato, a maior parte das exposições é causada por fontes naturais presentes no ambiente, e a maior parcela para a exposição a fontes artificiais

em todo o mundo é a utilização de radiações em Medicina. Além disso, ações do cotidiano como viagens aéreas e a vida em casas muito fechadas em certas partes do mundo, podem aumentar substancialmente a exposição à radiação.

Esta publicação é uma tentativa do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) e do secretariado do Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica (UNSCEAR) de contribuir para conscientizar e aprofundar a compreensão sobre fontes, níveis e efeitos da exposição às radiações ionizantes. Reunindo cientistas de 27 Estados Membros da Organização das Nações Unidas, o UNSCEAR foi criado pela Assembleia Geral da ONU em 1955 para avaliar a exposição à radiação, seus efeitos e riscos em escala mundial. No entanto, ele não define ou mesmo recomenda normas de segurança; em vez disso, fornece informação científica que permite às autoridades nacionais e a outros órgãos de fazê-lo. As evoluções científicas do UNSCEAR, por mais de 60 anos, são a principal fonte de informação para esta publicação.

1. O QUE É RADIAÇÃO?

Para sermos capazes de falar sobre os níveis, efeitos e riscos da exposição à radiação, precisamos primeiramente abordar algumas noções básicas sobre a ciência da radiação. Os materiais radioativos e a radioatividade produzida por estes existiam na Terra muito antes que a vida surgisse. De fato, eles estavam presentes no espaço desde a origem do universo e material radioativo fez parte da formação do planeta. Mas a humanidade descobriu esse elementar e universal fenômeno apenas no final do século dezenove, e nós ainda estamos aprendendo novas formas de usar a radioatividade.

1.1. Um pouco de história

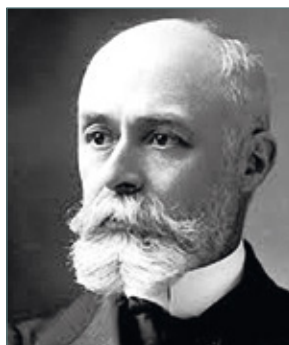
Em 1895, o físico alemão **Wilhelm Conrad Roentgen** descobriu um tipo de radiação – a qual chamou de raios X – que poderia ser utilizada para olhar dentro do corpo humano. Tal descoberta levou ao uso médico da radiação, que tem se expandido desde então. Roentgen recebeu o primeiro Prêmio Nobel de Física, em 1901, como reconhecimento aos extraordinários serviços prestados à humanidade. Um ano após a descoberta de Roentgen, **Henri Becquerel**, um cientista francês, colocou alguns filmes fotográficos em uma gaveta junto a fragmentos de um mineral contendo Urânio. Quando ele revelou os filmes descobriu, para sua surpresa, que estes foram afetados pela radiação. O fenômeno foi chamado de **radioatividade** e ocorre quando energia é liberada de um átomo espontaneamente, sendo medida nos dias de hoje em unidades denominadas becqueréis (Bq), após a descoberta de Henri Becquerel. Logo depois, uma jovem química, **Marie Skłodowska-Curie**, levou a pesquisa adiante e foi a primeira a usar o termo radioatividade. Em 1898, ela e o marido, **Pierre Curie**, descobriram que à medida que o Urânio liberava radiação, misteriosamente se transformava em outros elementos, um dos quais foi chamado de Polônio, em homenagem à terra natal de Marie Curie, e o outro elemento foi chamado de Rádio, o elemento “brilhante”.



Wilhelm C. Roentgen (1845–1923)



Marie Curie (1867–1934)



Henri Becquerel (1852–1908)

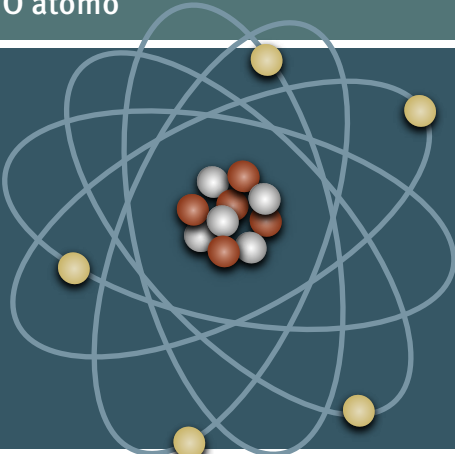
Marie Curie dividiu o Prêmio Nobel de física, em 1903, com Pierre Curie e Henri Becquerel. Ela foi a primeira mulher a ganhar o Nobel uma segunda vez, em 1911, por descobertas na química da radiação.

1.2. Alguns princípios básicos

O principal objetivo dos cientistas era compreender o *átomo* e, mais particularmente, a estrutura destes. Hoje sabemos que os átomos possuem um minúsculo núcleo carregado positivamente, cercado por uma nuvem de *elétrons* carregados negativamente. O núcleo representa cerca de cem milésimos do tamanho do átomo, mas é tão denso, que conta com quase a massa inteira do átomo.

O núcleo é normalmente um conjunto de partículas, *prótons* e *nêutrons*, unidas firmemente umas às outras. Os prótons possuem uma carga elétrica positiva, enquanto os nêutrons não possuem carga. Os elementos químicos são determinados pelo número de prótons de seus átomos (ex.: o Boro tem um átomo com 5 prótons, e o Urânio com 92 prótons). Os elementos com o mesmo número de prótons, mas com diferente número de nêutrons são chamados *isótopos* (ex.: Urânio-235 e Urânio-238 diferem entre si em três nêutrons em seu núcleo). Um átomo normalmente não é nem positivamente nem negativamente carregado, porque possui o mesmo número de elétrons-negativamente carregados e de prótons-positivamente carregados.

O átomo



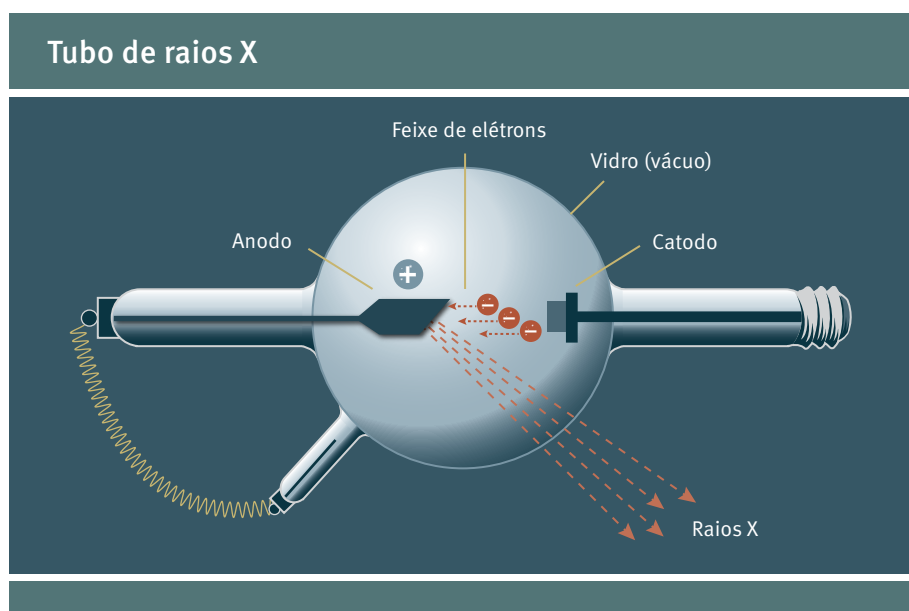
Número atômico	5	- número de elétrons
Símbolo	B	- número de prótons
Nome	BORO	

elétron próton nêutron

Um átomo é composto de um núcleo de nêutrons não carregados e de prótons positivamente carregados, rodeados por uma nuvem de elétrons negativamente carregados. Em átomos sem carga, o número de prótons e elétrons é igual, o que representa o número atômico do elemento.

Alguns átomos são naturalmente estáveis, enquanto outros são instáveis. Os átomos com o núcleo instável - os quais se transformam espontaneamente, liberam energia na forma de radiação - são conhecidos como **radionuclídeos**. Essa energia liberada pode interagir com outros átomos e ionizá-los. A **ionização** é o processo pelo qual os átomos se tornam positivamente ou negativamente carregados pelo ganho ou pela perda de elétrons. A radiação ionizante transfere energia suficiente para arrancar os elétrons de sua órbita, resultando na criação de átomos carregados denominados **íons**. A emissão de dois prótons e de dois nêutrons refere-se ao **decaimento alfa**, e a emissão de elétrons ao decaimento beta. Frequentemente, um nuclídeo instável é tão energizado que a emissão de partículas não é suficiente para estabilizá-lo. Este, então, libera uma explosão de energia na forma de ondas eletromagnéticas como fótons, denominadas **raios gama**.

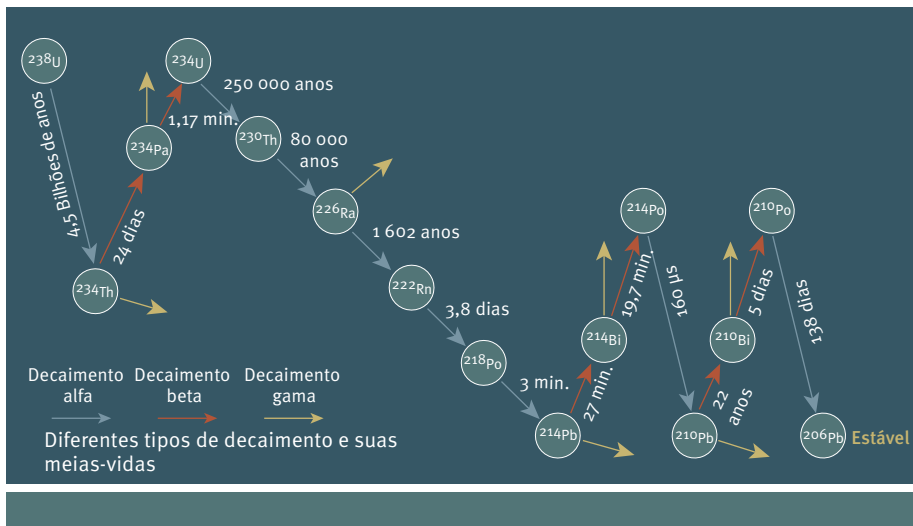
Raios X também são radiação eletromagnética, como os raios gama, mas com energia de fótons de menor intensidade. Um espectro de raios X com diferentes energias é produzido em um tubo a vácuo feito de vidro, no qual um feixe de elétrons emitido por um **catodo** é disparado contra um material alvo chamado de **anodo**. O espectro de raios X depende do material do anodo e da energia de aceleração do feixe de elétrons. Então, os raios X podem ser gerados artificialmente quando for preciso, o que é muito vantajoso em aplicações industriais e médicas.



Decaimento radioativo e meias-vidas

Embora todos os radionuclídeos sejam instáveis, alguns são mais instáveis que outros. Por exemplo, as partículas do núcleo do átomo de Urânio-238 (com 92 prótons e 146 nêutrons) são apenas capazes de se agrupar. Eventualmente, um grupo de dois prótons e dois nêutrons escapará, deixando o átomo na forma de uma partícula alfa, transformando o Urânio-238 em Tório-234 (com 90 prótons e 144 nêutrons). Porém, o Tório-234 também é instável e se transforma através de um processo diferente. Nesse processo, elétrons de alta energia são emitidos na forma de partículas beta, convertendo um nêutron em um próton e se transforma no Protactínio-234, com 91 prótons e 143 nêutrons. Este, por sua vez, é extremamente instável e rapidamente se transforma em Urânio-234. Consequentemente, o átomo vai liberando partículas até finalmente se transformar no Chumbo-206, com 82 prótons e 124 nêutrons, que é estável. Existem muitas sequências de transformação, ou *decaimento radioativo*, como o processo de transformação é chamado.

Urânio-238 – cadeia de decaimento radioativo



O período em que metade da quantidade de um elemento leva para decair é conhecido como *meia-vida*. Após uma meia-vida, de um total de um milhão de átomos em média 500 mil irão decair em outro elemento. Durante a próxima meia-vida, cerca de outros 250 mil átomos decairão e, assim, sucessivamente, até que todos tenham decaído. Após 10 meias-vidas, apenas cerca de mil átomos permanecerão na forma original (isto é, cerca de 0,1%). No exemplo dado acima, levaria um pouco mais de um minuto para que a metade dos átomos de Protactínio-234

decaísse a Urânio-234. Em contraste, para o Urânio-238 levaria quatro bilhões e meio de anos (4 500 000 000) para que metade dos átomos decaísse a Tório-234. Por isso, apenas poucos radionuclídeos ocorrem naturalmente no meio ambiente.

Unidades de radiação

Hoje sabemos que a energia da radiação pode danificar o tecido vivo, e a quantidade de energia acumulada nesse tecido vivo é expressa em termos de uma unidade denominada *dose*. A dose de radiação pode vir de qualquer radionuclídeo ou de um número de radionuclídeos, quer estes permaneçam fora do corpo ou o irradiem por dentro como, por exemplo, após inalação ou ingestão. As quantidades de doses são expressas de diferentes formas, dependendo de quanto o corpo, ou alguma parte do corpo, tenha sido irradiado, se uma ou muitas pessoas foram expostas e, ainda, da duração do período de exposição (p.ex. exposição aguda).

A quantidade de energia da radiação absorvida por quilograma de tecido é chamada de *dose absorvida* e é expressa em uma unidade denominada gray (Gy), em



homenagem ao físico inglês, Harold Gray, pioneiro em biologia da radiação. Mas isto não fornece o cenário completo sobre o assunto, pois a mesma dose proveniente de partículas alfa pode causar muito mais dano do que aquela proveniente de partículas beta ou de raios gama. Para comparar doses absorvidas resultantes de diferentes tipos de radiação, estas precisam ser calculadas por seu potencial de causar certos tipos de danos biológicos. Para comparar doses absorvidas resultantes de diferentes tipos de radiação, estas precisam ser ponderadas por seu potencial de causar certos tipos de danos biológicos. Essa dose ponderada é denominada *dose equivalente*, a qual é avaliada em uma unidade chamada sievert (Sv), em homenagem ao cientista sueco Rolf Sievert. Um sievert equivale a 1 000 milisieverts, assim como um litro equivale a 1 000 mililitros e um metro a 1 000 milímetros



Harold Gray (1905–1965)
Rolf Sievert (1896–1966)

Outra consideração é que algumas partes do corpo são mais vulneráveis que outras. Por exemplo, uma dada dose equivalente de radiação é mais provável que possa induzir um câncer no pulmão do que no fígado, sendo os órgãos reprodutores os de particular preocupação devido ao

risco de efeitos hereditários. Então, a fim de comparar doses quando diferentes tecidos e órgãos são irradiados, as doses equivalentes para diferentes partes do corpo são também ponderadas, sendo o resultado denominado *dose efetiva*, também expressa em sievert (Sv). Contudo, a dose efetiva é um indicador da probabilidade de indução de câncer e de efeitos genéticos advindos de baixas doses, e não como medida da gravidade de efeitos para altas doses.

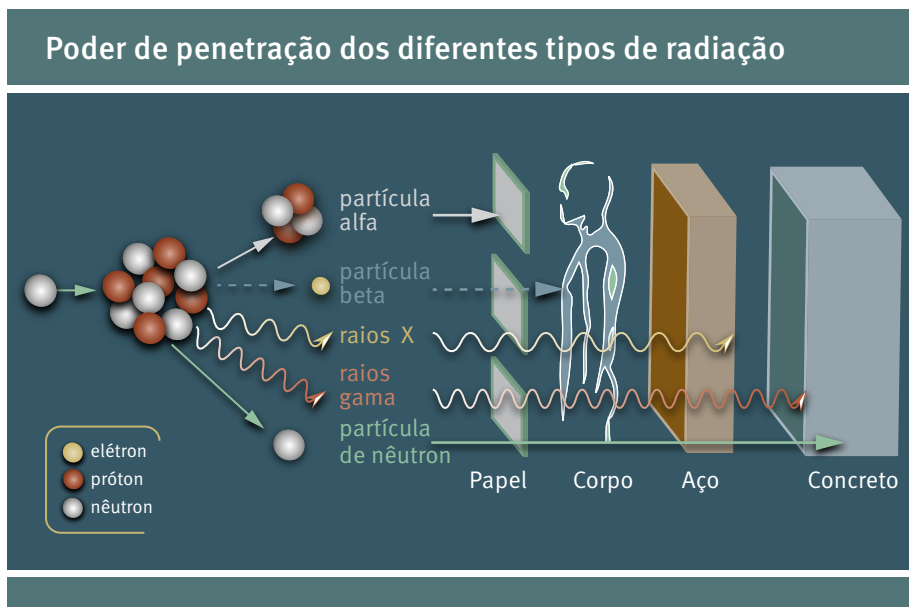
Este complexo sistema de quantidades de radiação é necessário para colocá-las em uma estrutura coerente, permitindo que os especialistas em proteção à radiação registrem as doses individuais de forma consistente e comparável, o que é de extrema importância para as pessoas que trabalham com radiação e que estão sujeitas à *exposição ocupacional*.

Quantidades de radiação	
Quantidade Física	
Atividade	Número de transformações nucleares de energia por unidade de tempo. Este é medido em decaimentos por segundo e expresso em becquerel (Bq).
Dose absorvida	Quantidade de energia depositada pela radiação em uma unidade de massa de material, tal como um tecido ou órgão. Esta é expressa em grays (Gy), que corresponde a joules por quilograma.
Quantidade calculada	
Dose equivalente	A dose absorvida é multiplicada por um fator de radiação (w_R) que leva em consideração a maneira como diferentes tipos de radiação causam danos biológicos em um tecido ou órgão. Esta é expressa em sieverts (Sv), que corresponde a joules por quilograma.
Dose efetiva	A dose equivalente multiplicada por um fator de ponderação para órgãos (w_T) que leva em conta a suscetibilidade de causar dano em diferentes tecidos e órgãos. Esta é expressa em sieverts (Sv), que corresponde a joules por quilograma.
Dose efetiva coletiva	Soma de todas as doses efetivas de uma população ou grupo de pessoas expostas à radiação. Esta é expressa em homem-sieverts (homem. Sv).

Isso, no entanto, descreve apenas doses individuais. Se adicionarmos todas as doses efetivas recebidas por cada indivíduo em uma população, o resultado é chamado de *dose efetiva coletiva* ou, simplesmente *dose coletiva*, sendo expressa em homem.sievert (homem.Sv). Por exemplo, a dose coletiva anual para a população mundial é acima de 19 milhões de homem.Sv, o que corresponde a uma dose média anual por pessoa de 3 mSv.

1.3. Poder de penetração da radiação

Em resumo, a radiação pode ter a forma de partículas (incluindo partículas alfa, beta e nêutron) ou de ondas eletromagnéticas (raios gama e raios X), todas com diferentes quantidades de energia. As diferentes energias de emissão e tipos de partículas apresentam diferente poder de penetração – e assim diferentes efeitos na matéria viva. Uma vez que as partículas alfa são compostas de dois prótons carregados positivamente e dois nêutrons, ela carrega a maior carga dentre todos os tipos de radiação. Tal carga acentuada significa que as partículas interagem em maior escala com os átomos ao redor. Essa interação reduz rapidamente a energia da partícula e, em consequência, reduz o poder de penetração. Partículas alfa podem ser bloqueadas, por exemplo, por uma folha de papel. As partículas beta, compostas de elétrons carregados negativamente, carregam menos carga e são, portanto, mais penetrantes que as partículas alfa. As partículas beta podem atravessar um ou dois centímetros de tecido vivo. Os raios gama e os raios X são extremamente penetrantes e podem atravessar qualquer material menos denso



do que uma chapa de aço. Nêutrons produzidos artificialmente são emitidos de um núcleo instável como resultado de uma fissão atômica ou uma fusão nuclear. Os nêutrons também podem ocorrer naturalmente como componente da radiação cósmica. Por serem partículas eletricamente neutras, os nêutrons possuem um alto poder de penetração quando interagem com um material ou tecido.

2. O QUE A RADIAÇÃO FAZ A NÓS?

Antes de entrar em maiores detalhes sobre os efeitos da exposição à radiação, devemos recordar o que os pioneiros na ciência da radiação expuseram anteriormente. Logo após a descoberta de **Henri Becquerel**, ele mesmo experimentou a mais preocupante desvantagem da radiação - o efeito que esta tem sobre os tecidos vivos. Um pequeno frasco de rádio que ele havia colocado no bolso lhe causou danos à pele.

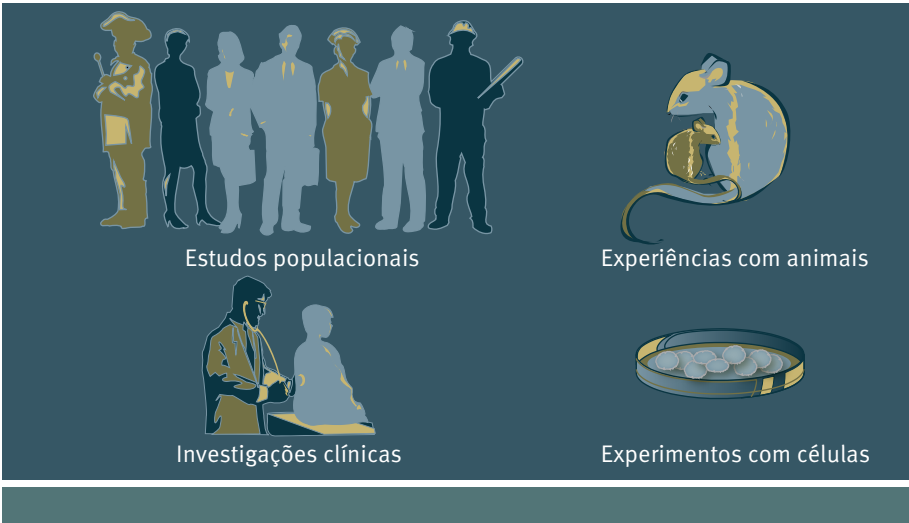
Wilhelm Conrad Roentgen, que descobriu os raios X em 1895, morreu de câncer no intestino, em 1923. **Marie Curie**, que esteve exposta à radiação ao longo de sua vida profissional, morreu de uma doença no sangue em 1934.

Existem informações de que no final dos anos 1950, pelo menos 359 pessoas que trabalhavam com radiação (principalmente médicos e outros cientistas) haviam morrido devido à exposição à radiação, ignorantes da necessidade de proteção.

Não surpreende que aqueles envolvidos na aplicação da radiação em pacientes foram os primeiros a desenvolver recomendações para a proteção dos trabalhadores à exposição à radiação. Em 1928, o Comitê Internacional de Proteção aos Raios X e ao Rádio foi estabelecido durante o Segundo Congresso Internacional de Radiologia em Estocolmo, e **Rolf Sievert** foi eleito como primeiro presidente. Após a Segunda Guerra Mundial – levando em conta os novos usos da radiação além da medicina – o Comitê foi reestruturado e renomeado como Comissão Internacional em Proteção Radiológica (International Commission on Radiological Protection – ICRP). Mais tarde, entre 1958 e 1960, Rolf Sievert foi o quarto presidente do UNSCEAR, no momento em que havia uma especial preocupação com os efeitos genéticos em humanos causados pelos testes com armas atômicas.

Com a expansão do conhecimento sobre os riscos associados com a exposição à radiação, o século XX presenciou o desenvolvimento de intensa pesquisa sobre os efeitos da radiação em humanos e no meio ambiente. A avaliação mais importante de grupos populacionais expostos à radiação é o estudo acerca de aproximadamente 86 500 sobreviventes das bombas atômicas de Hiroshima e Nagasaki, no final da Segunda Guerra Mundial, em 1945 (de agora em diante, descritos como os *sobreviventes das bombas atômicas*). Além disso, dados confiáveis sobre o assunto provêm da experiência com pacientes irradiados, de trabalhadores após exposição acidental (p.ex. acidente na usina nuclear de Chernobyl) e de experimentos de laboratório em animais e células.

Fontes de informação sobre os efeitos da radiação



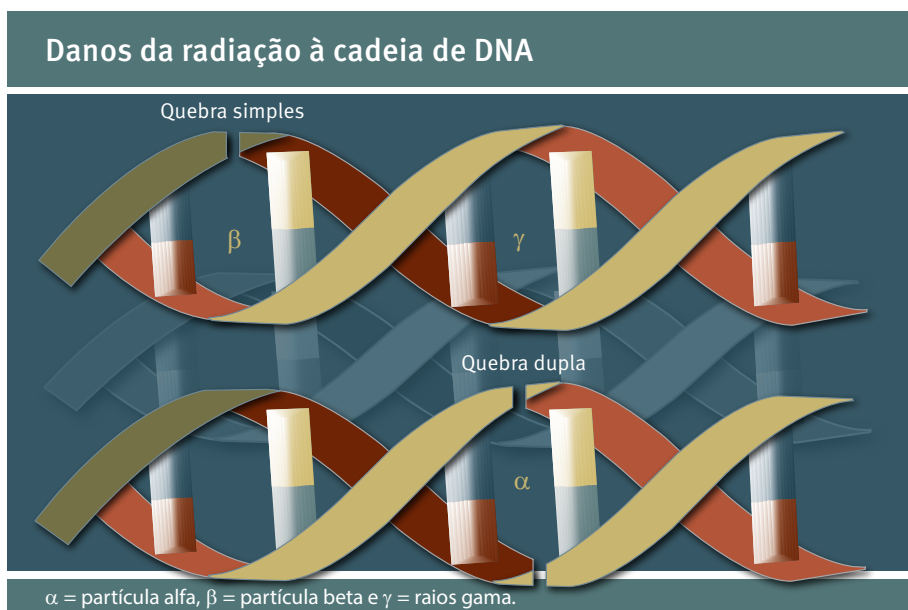
O UNSCEAR avalia informações científicas sobre os efeitos da exposição à radiação em humanos e no meio ambiente, tentando descobrir, da forma mais confiável possível, quais efeitos podem ser associados a diferentes níveis de exposição à radiação. Como mencionado anteriormente, a exposição à radiação depende do tipo de radiação, do tempo durante a qual esta é entregue e da quantidade de energia depositada no material. Para essas avaliações, o UNSCEAR atualmente usa o termo baixa dose para indicar níveis menores que 100 mGy, mas superiores a 10 mGy, e o termo dose muito baixa para qualquer nível abaixo de 10 mGy.

Faixas de doses utilizadas pelo UNSCEAR

Dose alta	Maior do que ~1Gy	Acidentes de radiação graves (p.ex.: bombeiros no acidente de Chernobyl)
Dose moderada	~100 mGy a ~ 1 Gy	Trabalhadores em operação de recuperação após o acidente de Chernobyl
Dose baixa	~10 mGy a ~ 100mGy	Múltiplas tomografias computadorizadas (TC)
Dose muito baixa	Menor do que ~10mGy	Radiografia convencional (isto é, sem TC)

2.1. Efeitos em humanos

Desde a descoberta da radiação mais de um século de pesquisa tem fornecido informação extensiva sobre os mecanismos biológicos pelos quais esta pode afetar a saúde. Sabe-se que a radiação pode produzir efeitos em nível celular, causando sua morte ou modificação, devido aos danos causados nas fitas do ácido desoxirribonucleico (DNA) em um cromossomo. Se o número de células danificadas ou mortas for grande o suficiente, poderá ter como resultado a disfunção do órgão, ou até mesmo a morte do mesmo. Além disso, outro dano ao DNA também pode ocorrer sem que haja morte celular. Esse dano é geralmente reparado completamente, mas se não o for, a modificação resultante – conhecida como *mutação celular* – causará reflexo nas divisões celulares subsequentes e poderá, finalmente, levar ao câncer. Se as células modificadas forem aquelas que transmitem a informação hereditária aos descendentes, desordens genéticas podem surgir. Informações sobre os mecanismos biológicos e efeitos hereditários são frequentemente obtidos por experimentos de laboratório.



Com base na observação de sua ocorrência, efeitos na saúde advindos da exposição à radiação são definidos aqui tanto como efeitos imediatos à saúde, quanto tardios. Geralmente, efeitos imediatos à saúde são evidentes através do diagnóstico de síndromes clinicamente verificadas nos indivíduos, e os efeitos tardios – como o câncer – são evidenciados através de estudos epidemiológicos feitos pela observação do aumento da ocorrência da patologia em uma população. Além disso, uma atenção especial é dada aqui aos efeitos nas crianças e nos embriões/fetos, além dos efeitos hereditários.

Efeitos imediatos à saúde

Os efeitos imediatos à saúde são causados pela morte/dano extensivos sobre a célula. Os exemplos são queimaduras na pele, perda de cabelo e diminuição da fertilidade. Estes efeitos à saúde são caracterizados por um limiar relativamente alto que deve ser excedido por um curto período antes que os efeitos ocorram. A severidade do efeito aumenta com o aumento da dose após o limiar ser excedido.

Geralmente, doses agudas maiores que 50 Gy danificam o sistema nervoso central de tal forma que a morte ocorre em poucos dias. Mesmo para doses inferiores a 8 Gy, as pessoas apresentam sintomas de doença causada por radiação, também conhecida como *síndrome aguda da radiação*, que podem incluir náusea, vômitos, diarreia, cólicas intestinais, salivação, desidratação, fadiga, apatia, letargia, sudorese, febre, dor de cabeça e pressão baixa. O termo aguda refere-se a problemas médicos que ocorrem imediatamente após a exposição, em vez daqueles que se desenvolvem após um período prolongado. Contudo, as vítimas podem sobreviver no início, morrendo por um problema gastrointestinal, uma ou duas semanas depois. Doses menores podem não causar danos gastrointestinais, mas ainda causam a morte após alguns meses, principalmente devido a danos na medula óssea. Mesmo doses menores irão retardar o início de doenças e produzirão menos sintomas severos. Cerca de metade daqueles que recebem doses de 2 Gy sofrem com vômitos cerca de três horas após a exposição, mas isso é raro com doses abaixo de 1 Gy.

Exposição acidental em medicina

Radioterapia envolve a entrega de altas doses aos pacientes. Portanto, a prevenção de efeitos agudos é uma prioridade.



Felizmente, se a medula óssea e o resto do sistema de produção do sangue receber uma dose inferior a 1 Gy, estes possuem uma extraordinária capacidade de regeneração, podendo se recuperar completamente – porém existirá um alto risco de desenvolvimento de leucemia alguns anos depois. Se apenas uma parte do corpo for irradiada, suficiente medula óssea normalmente sobreviverá intacta para repor a parte danificada. Experimentos com animais sugerem que mesmo se apenas um décimo da medula óssea ativa não sofrer irradiação, as chances de sobrevivência estão perto de 100%.

O fato de que a radiação pode danificar diretamente o DNA da célula é aplicado para deliberadamente matar células malignas com *radiação*, no tratamento do câncer conhecido como radioterapia. A quantidade total de radiação aplicada em radioterapia varia, dependendo do tipo e do estágio do câncer que esteja sendo tratado. Doses típicas para o tratamento de tumores sólidos variam de 20 a 80 Gy no tumor, o que poderia pôr em perigo o paciente se transmitida como dose única. Então, a fim de controlar o tratamento, as doses de radiação são aplicadas em frações repetidas de no máximo 2 Gy. Esse fracionamento permite que as células do tecido sadio se recuperem, enquanto as células tumorais são mortas porque são geralmente menos eficientes na recuperação após a exposição à radiação.

Efeitos tardios à saúde

Os efeitos tardios ocorrem um longo tempo após a exposição. Em geral, a maioria dos efeitos tardios à saúde são também efeitos estatísticos, isto é, para os quais a probabilidade de ocorrência depende da dose de radiação recebida. Supõe-se que estes efeitos à saúde sejam causados por modificações no material genético da célula após a exposição. Exemplos de efeitos tardios são tumores sólidos e leucemia ocorrendo em pessoas expostas à radiação, além de desordens genéticas ocorrendo nos descendentes de pessoas expostas. A frequência com que tais efeitos ocorrem em uma população – mas não a severidade – parecem aumentar com altas doses.

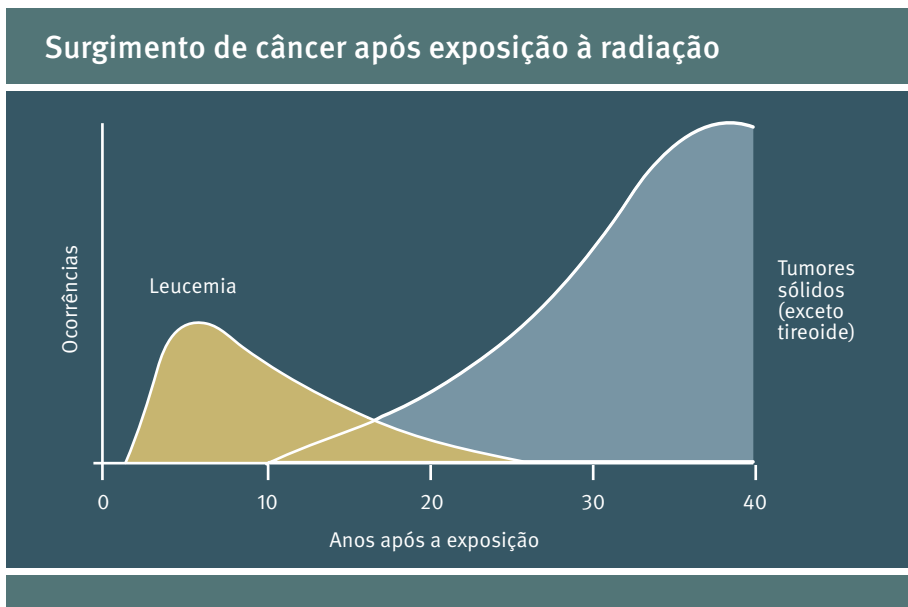
Estudos epidemiológicos são de grande importância na compreensão dos efeitos tardios após exposição à radiação. Esses estudos usam métodos estatísticos para comparar a ocorrência de um efeito à saúde (p.ex. câncer) em uma população exposta, em relação a uma população não exposta. Se um aumento considerável de ocorrência é encontrado em uma população exposta, isto pode estar associado com a exposição à radiação para uma população como um todo.

A avaliação de longo prazo mais importante sobre as populações expostas à radiação é o estudo epidemiológico dos sobreviventes das bombas atômicas. É o estudo mais abrangente já conduzido devido ao grande número de pessoas, essencialmente representativo da população geral, que recebeu uma ampla variação de doses de forma relativamente homogênea sobre o corpo. Estimativas das doses recebidas por esse grupo são também relativamente bem conhecidas. Até agora, o estudo revelou algumas centenas a mais de casos de câncer do que seria esperado para esse grupo, se este não tivesse sido exposto à radiação. Porque muitos dos sobreviventes das bombas atômicas ainda estão vivos, os estudos continuam, a fim de completar a avaliação.

Câncer

O câncer é responsável por cerca de 20% de todas as fatalidades, sendo a causa mais comum de morte nos países industrializados, depois das doenças cardiovasculares. Cerca de quatro em cada dez pessoas da população em geral poderá desenvolver câncer durante a vida, mesmo na ausência de exposição à radiação. Nos últimos anos, os tipos de câncer mais comuns entre os homens são o de pulmão, próstata, colorretal, estômago e fígado, e nas mulheres o de mama, colorretal, pulmão, colo do útero e estômago.

O desenvolvimento do câncer é um processo complexo, consistindo de um número de estágios. Um fenômeno inicial, provavelmente afetando uma única célula, parece iniciar o processo, mas uma série de outros eventos parece ser necessária antes que



a célula se torne maligna e desenvolva o tumor. O câncer se torna evidente somente muito após o primeiro dano é feito, seguindo o período de latência. A probabilidade de ocorrência de câncer após a exposição à radiação é a principal preocupação, podendo ser calculada para um determinado grupo se este fosse exposto a um nível de radiação suficientemente alto para causar um aumento da ocorrência da doença que superasse a estatística e outras incertezas. Contudo, a contribuição real da radiação como causa do câncer permanece desconhecida.

Leucemia, câncer de tireoide e câncer ósseo aparecem apenas alguns anos após exposição à radiação, enquanto que a maior parte dos outros tipos da doença não se manifesta até, no mínimo, 10 anos, e frequentemente várias décadas após a exposição. Entretanto, nenhum tipo de câncer é unicamente causado por exposição à radiação, logo, é impossível distinguir os tumores induzidos por radiação daqueles originados por outras causas. Todavia, é importante estimar a probabilidade de se ter a doença após certas doses de radiação, a fim de fornecer base científica sólida para estabelecer limites de exposição.

Estudos em pessoas que receberam tratamento médico usando radiação, indivíduos ocupacionalmente expostos, e – sobretudo – os sobreviventes das bombas atômicas são a base do conhecimento sobre a relação entre o câncer e a exposição à radiação. Esses estudos cobrem uma grande amostra de indivíduos que foram expostos em várias partes do corpo e que foram acompanhados por longos períodos. Porém, alguns estudos apresentam grandes dúvidas, principalmente quanto à diferente distribuição etária em relação à da população normal, e a evidência de que muitos destes pacientes já estavam doentes quando irradiados, já tendo recebido tratamento para câncer.

Mais ainda, quase todos os dados baseiam-se no estudo de pessoas cujos tecidos receberam doses bastante elevadas de radiação, um gray ou mais, tanto como uma dose única, quanto ao longo de períodos relativamente curtos. Existe pouca informação sobre os efeitos do recebimento de baixas doses por um longo período – apenas alguns poucos estudos acerca dos efeitos da variação das doses normalmente recebidas por pessoas que trabalham com radiação, não havendo praticamente nenhuma informação direta sobre as consequências da exposição a que as pessoas em geral estão rotineiramente sujeitas. Estudos precisariam rastrear um grande número de indivíduos por um longo período e, eventualmente, poderiam ser muito ineficientes para observar aumentos na ocorrência de câncer, comparando-se com a linha de base das taxas de incidência de câncer.

O UNSCEAR tem conduzido revisões abrangentes sobre a incidência de câncer em populações expostas à radiação, e estimou que a chance adicional de morte por câncer causado pela exposição à radiação acima de 100 mSv era de cerca de 3 a 5 em 100, por sievert.

Outros efeitos à saúde

Doses elevadas de radiação no coração aumentam a probabilidade de doenças cardiovasculares (p.ex. ataque cardíaco). Este tipo de exposição pode acontecer durante a radioterapia, apesar das técnicas de tratamento hoje em dia resultarem em baixas doses no coração. Contudo, não há evidência científica que possa concluir que a exposição a baixas doses de radiação cause doenças cardiovasculares.

O UNSCEAR reconhece que houve um aumento de incidência de catarata entre os profissionais de emergência em Chernobyl, possivelmente associado às elevadas doses de radiação. Além disso, o UNSCEAR também estudou os efeitos da radiação no sistema imunológico dos sobreviventes das bombas atômicas, dos trabalhadores de emergência da usina nuclear de Chernobyl e em pacientes submetidos a tratamentos de radioterapia. Os efeitos da radiação no sistema imunológico são avaliados por estimativa de mudança no número de células, ou pelo uso de uma variedade de análises funcionais. Doses elevadas de radiação suprimem o sistema imunológico, principalmente devido a danos aos linfócitos. Sua redução é, geralmente, usada como um indicador inicial para determinar a dose de radiação após uma exposição aguda.

Efeitos na descendência

Se os danos da radiação ocorrerem nas células reprodutivas, o esperma ou o óvulo, isso pode levar a efeitos hereditários nos descendentes. Além disso, a radiação pode prejudicar diretamente o embrião ou o feto ainda em desenvolvimento no útero. É importante distinguir entre exposição à radiação em adultos, crianças e embriões/fetos. O UNSCEAR tem conduzido amplas revisões relacionadas aos efeitos à saúde, incluindo efeitos hereditários nesses grupos.

Efeitos nas crianças

Efeitos à saúde em humanos dependem de um número de fatores físicos. Devido às diferenças anatômicas e fisiológicas, os impactos da exposição à radiação em crianças e em adultos são diferentes. Além disso, devido às crianças terem corpos menores e serem menos protegidas pelos tecidos, as doses em seus órgãos internos serão maiores do que para adultos, para um mesmo nível de exposição externa. As crianças também são mais baixas que os adultos, podendo receber doses mais elevadas dos radionuclídeos depositados no solo.

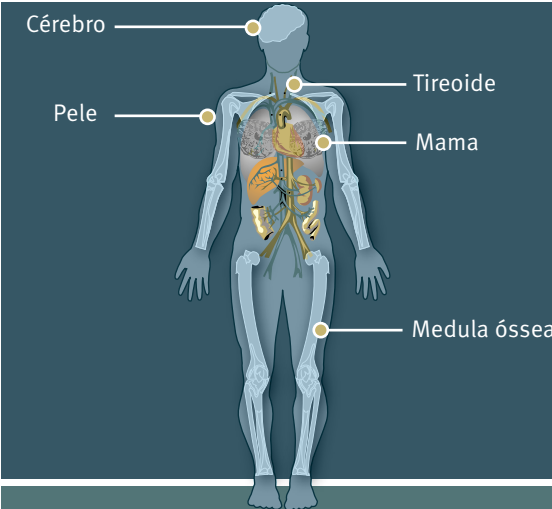
Considerando a exposição interna, devido ao menor tamanho das crianças e porque os órgãos delas são mais próximos, radionuclídeos concentrados em um órgão irradiam para outros mais do que ocorreria em adultos. Existem também variados fatores relacionados à idade, envolvendo o metabolismo e a fisiologia, os quais

fazem uma diferença substancial na dose para diferentes grupos etários. Diversos radionuclídeos são de particular preocupação no que se refere à exposição interna em crianças. Acidentes envolvendo desprendimento de Iodo-131 radioativo podem ser fontes significantes de exposição para a tireoide. Para uma dada quantidade captada pela glândula, a dose na tireoide das crianças é cerca de nove vezes maior que para os adultos. Estudos do acidente na usina nuclear de Chernobyl confirmaram a ligação entre o câncer de tireoide e o Iodo-131, que se concentra principalmente nesse órgão.

Estudos epidemiológicos mostraram que pessoas jovens, abaixo dos 20 anos, parecem ter duas vezes mais probabilidade que os adultos de desenvolver leucemia, para a mesma taxa de exposição à radiação. Além disso, crianças abaixo de 10 anos são particularmente suscetíveis; alguns outros estudos sugerem que elas têm três ou quatro vezes mais probabilidade de morrer de leucemia do que os adultos. Outros estudos também mostraram que meninas expostas abaixo de 20 anos de idade possuem duas vezes mais probabilidade de desenvolver câncer de mama do que mulheres adultas. Crianças são mais suscetíveis que os adultos a desenvolverem câncer após exposição à radiação, mas a doença pode não aparecer até que as crianças alcancem uma idade na qual esta se torna evidente.

O UNSCEAR tem revisado material científico que indica que a ocorrência de câncer em crianças é mais variável que em adultos e depende do tipo de tumor, da idade da criança e do sexo. O termo *radiossensibilidade* com relação à indução de câncer se refere às taxas de tumores causados pela irradiação. Estudos

Órgãos mais radiossensíveis em crianças



Cérebro

Pele

Tireoide

Mama

Medula óssea

Crianças expostas à radiação em idades inferiores a 20 anos são duas vezes mais propensas a desenvolver **câncer no cérebro** do que adultos expostos à mesma dose. Uma associação semelhante foi notada para **câncer de mama** em meninas que foram expostas com idades inferiores a 20 anos.

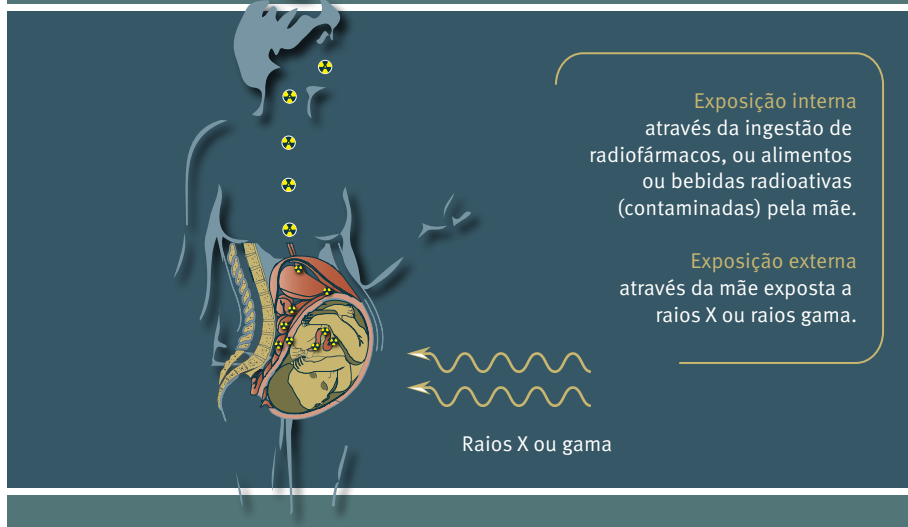
sobre as diferenças de radiosensibilidade entre adultos e crianças descobriram que as crianças são mais sensíveis ao desenvolvimento de câncer de tireoide, cérebro, pele, mama e leucemia.

Diferenças nos efeitos imediatos à saúde em crianças após elevadas doses (como aquelas recebidas em radioterapia) são complexas e podem ser explicadas pela interação com tecidos e mecanismos biológicos diferentes. Alguns efeitos são mais evidentes para exposição na infância do que na maioridade (p.ex. defeitos cerebrais, catarata e nódulos na tireoide); e existem poucos efeitos para os quais os tecidos das crianças são mais resistentes (p.ex. pulmões e ovários).

Efeitos em crianças não nascidas

Um embrião ou feto pode ser exposto através do material radioativo transferido através da mãe via alimentação ou bebida (exposição interna), ou diretamente através de exposição externa. Devido ao feto ser protegido no útero, sua dose de radiação tende a ser menor que a da mãe para a maior parte dos eventos envolvendo exposição à radiação. Porém, o embrião e o feto são particularmente sensíveis à radiação, e as consequências na saúde devido à exposição podem ser severas, mesmo em doses de radiação mais baixas que aquelas que afetam a mãe imediatamente. Tais consequências podem incluir retardo no crescimento, má formação, função cerebral comprometida e câncer.

Meios de exposição à radiação do embrião



O desenvolvimento dos mamíferos no útero pode ser reduzido grosseiramente a três estágios. É sabido que a radiação pode matar o embrião no útero durante o primeiro estágio, que dura desde a concepção até o ponto em que este se fixa na parede do útero, o que ocorre nas duas primeiras semanas de gestação em humanos. É muito difícil estudar o que acontece nesse estágio; contudo, informações principalmente de experimentos com animais confirmam o efeito fatal em embriões em estágio inicial expostos a doses de radiação acima de certos limiares.

Durante o próximo estágio, que em humanos dura da segunda à oitava semana de gestação, o principal perigo é que a radiação pode levar à má formação dos órgãos em crescimento e, talvez, causar a morte na época do parto. Experimentos com animais têm mostrado que os órgãos (p.ex. olhos, cérebro, esqueleto) são particularmente susceptíveis à má formação se forem irradiados quando em desenvolvimento.

O maior dano parece ocorrer no sistema nervoso central após a oitava semana, quando o terceiro e último estágio da gestação se inicia. Muito progresso tem sido feito na compreensão dos efeitos de exposição à radiação no cérebro de não nascidos. Como um exemplo, 30 crianças nascidas de sobreviventes das bombas atômicas dentre as quase 1 600 foram expostas a uma dose de 1 Gy antes do nascimento, apresentaram extrema deficiência intelectual.

Tem havido muita controvérsia sobre se a exposição de embriões à radiação pode causar câncer ao longo da vida. Experimentos com animais falharam em demonstrar alguma relação específica. O UNSCEAR tem tentado estimar todos os riscos aos não nascidos para um número de efeitos da irradiação – morte, má formação, deficiência intelectual e câncer. Para todos, calcula-se que não mais que duas dentre cada 1 000 crianças nascidas vivas e que foram expostas no útero a uma dose de um centésimo de um gray podem ser afetadas – comparadas aos 6% que desenvolvem os mesmos efeitos naturalmente.

Efeitos hereditários

A radiação pode modificar as células transmitindo informações hereditárias aos descendentes, o que pode causar desordens genéticas. O estudo de tais desordens é difícil porque existe pouca informação sobre os danos genéticos que os humanos podem tolerar através da exposição à radiação, em parte porque o registro completo dos efeitos genéticos leva muitas gerações para aparecer e, também porque – assim como para o câncer – esses efeitos quase não seriam diferenciados dos induzidos por outras causas.

Muitos dos embriões e fetos severamente afetados não sobrevivem. Estima-se que cerca da metade de todos os abortos espontâneos ocorre com bebês que possuem uma constituição genética anormal. Mesmo que esses sobrevivam ao nascimento, os recém-nascidos com desordens genéticas possuem cerca de cinco vezes mais probabilidade de morrer antes do quinto mês de vida do que os normais.

Os efeitos hereditários podem ser divididos em duas categorias principais: aberrações cromossômicas envolvendo mudanças no número ou estrutura dos cromossomos, e mutações dos genes. Os efeitos podem aparecer nas gerações subsequentes, mas não necessariamente.

Estudos em crianças cujos pais foram sobreviventes das bombas atômicas falharam em encontrar efeitos hereditários perceptíveis. Isso não significa que nenhum dano tenha sido estimulado, apenas que a exposição à radiação moderada de até mesmo uma população relativamente grande não possui impactos observáveis. No entanto, estudos experimentais em plantas e animais expostos a elevadas doses têm claramente demonstrado que a radiação pode induzir os efeitos hereditários. É improvável que humanos sejam uma exceção.

O UNSCEAR tem se concentrado apenas nos efeitos hereditários severos e estimou que o risco total seja de cerca de 0,3-0,5% por gray – o que é menor que um décimo da possibilidade de ocorrência de um câncer fatal – para a primeira geração exposta à radiação.

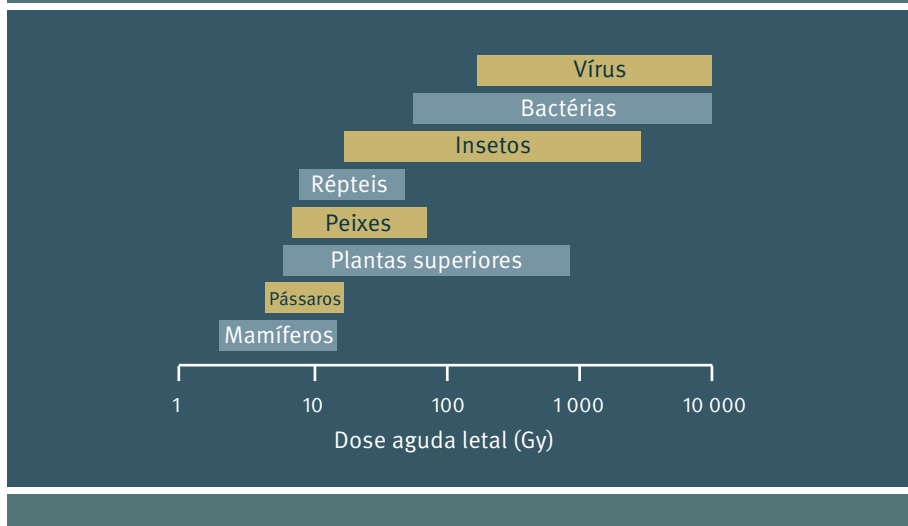
2.2. Efeitos em animais e plantas

Efeitos da exposição à radiação em animais e plantas têm recebido maior atenção do que anteriormente. Em décadas passadas, a visão predominante era a de que se a vida humana fosse adequadamente protegida, tanto as plantas quanto os animais seriam similarmente protegidos. O UNSCEAR avaliou os efeitos da exposição à radiação em plantas e animais e encontrou que com uma variação de dose teórica entre 1 a 10 Gy era improvável que resultasse em efeitos nas populações de animais e plantas, e que respostas individuais à exposição variavam (os mamíferos são os mais sensíveis entre os animais). Os efeitos mais prováveis de serem significantes em nível populacional seriam a fertilidade, a mortalidade e a indução de mutações. *Variações reprodutivas*, tais como o número de descendentes, são um indicador mais sensível dos efeitos da radiação do que a mortalidade.

Doses letais representam doses para as quais 50% dos indivíduos expostos iriam morrer. Para plantas expostas por um período de tempo relativamente curto

(*aguda*), isso tem sido notado para doses que variam de 10 a cerca de 1 000 Gy. Em geral, plantas maiores são mais radiosensíveis do que as menores. Doses letais variam de 6 a 10 Gy para os mamíferos pequenos, e cerca de 2,5 Gy para os maiores. Alguns insetos, bactérias e vírus podem tolerar doses acima de 1 000 Gy.

Variações de doses agudas letais para alguns animais e plantas



Uma fonte importante de informação tem sido as observações obtidas pela exposição à radiação de animais e plantas em áreas ao redor da usina energia nuclear de Chernobyl. O UNSCEAR avaliou as trajetórias através das quais o meio ambiente foi exposto e desenvolveu novas metodologias para avaliar os efeitos potenciais dessa exposição.

Recentemente, o UNSCEAR estimou doses e efeitos associados à exposição à radiação para determinados animais e plantas após o acidente da usina nuclear de Fukushima-Daiichi e concluiu que as exposições foram, em geral, muito baixas para que efeitos agudos pudessem ser observados. No entanto, mudanças nos *biomarcadores*, que são indicadores de uma doença ou estado fisiológico particular de um organismo - em especial para os mamíferos - não poderiam ser desconsiderados, mas a significância destes para a integridade populacional daqueles organismos não foi clara.

É importante salientar que ações protetivas e de remediação conduzidas para reduzir a exposição à radiação em humanos pode ter um impacto mais abrangente. Por exemplo, estas podem afetar bens e serviços ambientais, insumos usados na agricultura, silvicultura, na pesca e no turismo, além de locais utilizados para atividades espirituais, culturais e recreativas.

2.3. Relação entre doses de radiação e efeitos

Ao resumir a relação entre doses de radiação e efeitos à saúde, o UNSCEAR tem enfatizado a importância de se distinguir entre observações de efeitos à saúde existentes em populações expostas, e projeções teóricas de possíveis efeitos futuros. Para ambas as situações, é importante levar em conta qualquer incerteza e possíveis imprecisões – relacionadas à medições de radiação, considerações estatísticas, ou outros fatores.

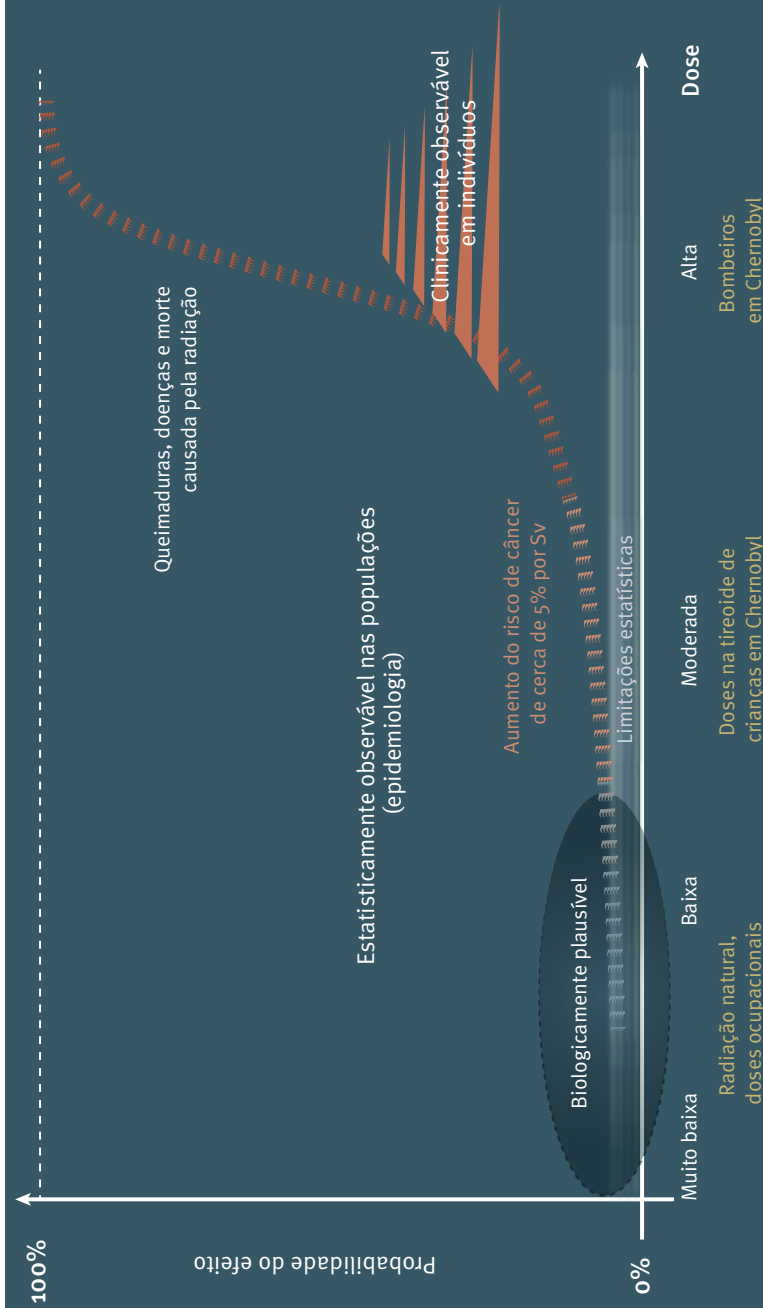
Dado o estado atual do conhecimento, os efeitos à saúde observados podem ser seguramente atribuídos à exposição à radiação, se os efeitos imediatos (p.ex. queimaduras na pele) ocorrem em indivíduos após doses acima de 1 Gy. Essas doses podem surgir em acidentes com radiação, como aqueles ocorridos com os trabalhadores de emergência durante o acidente na usina nuclear de Chernobyl, ou para pacientes durante acidentes em radioterapia.

É possível, utilizando métodos epidemiológicos, atribuir um aumento da ocorrência de efeitos tardios (p.ex. câncer) em uma população exposta a doses moderadas de radiação se o aumento observado for elevado o suficiente para superar as incertezas. Contudo, não há atualmente biomarcadores úteis para distinguir se um câncer foi causado por exposição à radiação ou não.

Onde o nível de exposição à radiação foi baixo, ou muito baixo – mais tipicamente a exposição à radiação ambiental ou ocupacional – mudanças na ocorrência de efeitos tardios não têm sido confirmados, dadas as estatísticas observadas e outras incertezas. Porém, tais efeitos não podem ser desconsiderados.

No que diz respeito a possíveis efeitos futuros à saúde existe um entendimento de como estimar a probabilidade de ocorrência dos efeitos para doses elevadas e moderadas. No entanto, para doses baixas e muito baixas, é necessário fazer suposições e usar modelos matemáticos para estimar a probabilidade de qualquer efeito à saúde, o que resulta em valores incertos. Consequentemente, para doses de radiação baixas e muito baixas, o UNSCEAR escolheu não usar esses modelos em suas avaliações – seguindo, por exemplo, os acidentes de Chernobyl e Fukushima – para fazer projeção do número de efeitos à saúde ou mortes devido a incertezas inaceitáveis nas avaliações. Porém, para comparações de saúde pública, ou com o objetivo de proteção à radiação, pode ser útil fazer os cálculos precavendo-se de que estas incertezas estão sendo levadas em conta e que as limitações sejam claramente explicadas.

Relação entre doses de radiação e efeitos na saúde



3. DE ONDE VEM A RADIAÇÃO?

Estamos continuamente expostos à radiação proveniente de diferentes fontes. Todas as espécies da Terra têm existido e evoluído em ambientes nos quais têm sido expostos à radiação natural. Mais recentemente, os humanos e outros organismos vivos têm sido também expostos a fontes artificiais desenvolvidas pelo homem desde o século passado. Mais de 80% de nossa exposição provém de fontes naturais e apenas 20% de fontes artificiais feitas pelo homem – principalmente de aplicações da radiação na medicina. A exposição à radiação é classificada nessa publicação por suas fontes, com foco no que a população em geral recebe. Para fins regulatórios, (p.ex. proteção à radiação) a exposição à radiação é tratada por diferentes grupos. Para tal fim, informações adicionais são fornecidas sobre pacientes – os quais são expostos devido ao uso médico da radiação – e sobre pessoas expostas em seus locais de trabalho.

Outra forma de classificar a exposição à radiação é verificar de que modo ela nos irradia. Substâncias radioativas e radiação presentes no ambiente podem irradiar a nosso corpo de fora – *externamente*. Ou nós podemos inalar substâncias presentes no ar, ingerir na comida ou na água ou, ainda, absorver através da pele ou por ferimentos, sendo irradiados por dentro – *internamente*. De modo global, doses de exposições internas e externas são tratadas quase da mesma forma.

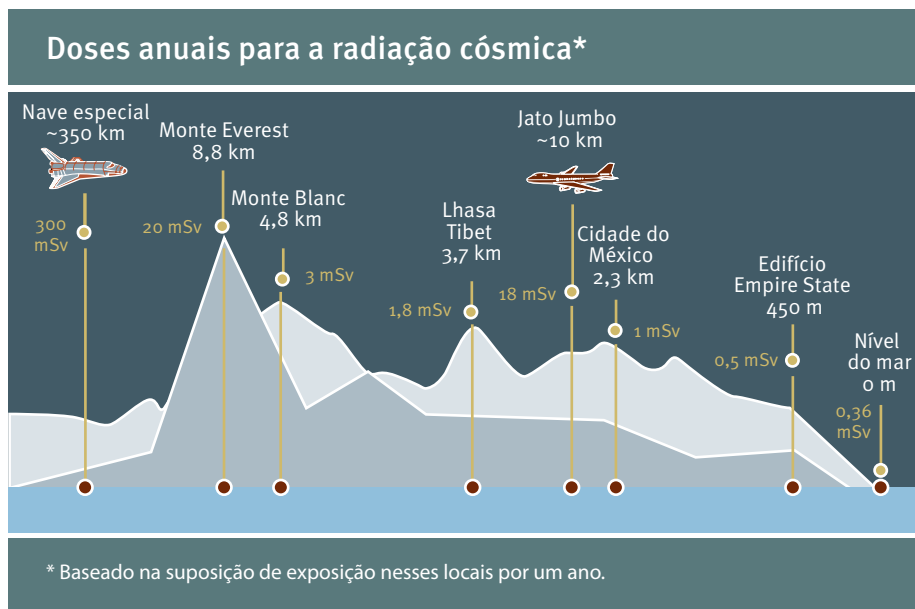


3.1. Fontes naturais

Desde a criação da Terra, o meio ambiente tem sido exposto à radiação proveniente tanto do espaço quanto de materiais radioativos presentes na crosta terrestre e no núcleo. Não há maneira de evitar a exposição às fontes naturais, o que de fato causa a maior parte da exposição à radiação da população mundial. A dose efetiva média anual global por pessoa é de cerca de 2,4 mSv, e varia em cerca de 1 mSv a mais de 10 mSv, dependendo do local onde as pessoas vivem. Os edifícios podem apresentar um gás radioativo específico, chamado Radônio, ou os materiais que compõem o edifício podem conter radionuclídeos que aumentem a exposição à radiação. Apesar das fontes naturais, nossa exposição pode ser modificada pelas escolhas que fazemos, tais como vivemos e onde moramos, ou o que comemos e bebemos.

Fontes Cósmicas

Os raios cósmicos são a maior fonte natural de exposição externa à radiação. A maioria desses raios tem origem no mais profundo espaço interestelar; alguns são liberados pelo sol durante as erupções solares. Esses irradiam a Terra diretamente e interagem com a atmosfera, produzindo diferentes tipos de radiação e de materiais radioativos. Os raios cósmicos são a fonte de radiação dominante do espaço sideral. Embora a atmosfera da Terra e o campo magnético reduzam consideravelmente a radiação cósmica, algumas partes do globo são mais expostas do que outras. Como a radiação cósmica é defletida pelo campo magnético para os polos Norte e Sul, essas regiões recebem mais radiação que as regiões equatoriais.



Além disso, o nível de exposição aumenta com a altitude porque existe menor massa de ar nas regiões mais elevadas para agir como escudo protetor, ou blindagem. Então, as pessoas que vivem ao nível do mar recebem, em média, uma dose efetiva anual de cerca de 0,3 mSv proveniente de fontes cósmicas de radiação ou, grosseiramente, 10 – 15% de sua dose total proveniente de fontes naturais. Aqueles que vivem acima de 2 000 metros de altitude recebem uma quantidade muitas vezes maior de dose. Passageiros e tripulantes de aviões podem ser expostos a doses ainda mais elevadas, já que a exposição à radiação de fontes cósmicas depende não somente da altitude, mas também do tempo de duração do voo. Por exemplo, em determinadas altitudes, a dose efetiva média é de 0,03 a 0,08 mSv para um voo de 10 horas. Em outras palavras, um voo de rota Nova Iorque – Paris, ida e volta, resultaria à exposição de uma pessoa a cerca de 0,05 mSv. Essa dose é aproximadamente igual à dose efetiva que um paciente receberia em um exame de raios X de tórax. Apesar de as doses efetivas serem estimadas individualmente por passageiro durante um voo, esta é considerada baixa, mas as doses coletivas podem ser bastantes elevadas devido ao grande número de passageiros e de voos que ocorrem no mundo.

EXPOSIÇÃO EM LOCAIS DE TRABALHO

As doses oriundas de fontes cósmicas são particularmente importantes para as pessoas que voam frequentemente, como os pilotos e a tripulação, que recebem uma média de 2 a 3 mSv, anualmente. As doses também têm sido medidas em missões espaciais. As doses informadas para missões espaciais curtas foram na faixa de 2 a 27 mSv, dependendo da atividade solar. Contudo, um astronauta em uma missão de quatro meses para a estação espacial internacional que orbita a Terra a 350 km recebe uma dose efetiva de cerca de 100 mSv.

Fontes Terrestres

Solo

Tudo sobre a Terra e no seu interior contém radionuclídeos primitivos. Esses são de vida extremamente longa e podem ser encontrados no solo – como o Potássio-40, Urânio-238 e o Tório-232 – junto com os radionuclídeos produzidos por seus decaimentos – como o Rádio-226 e o Radônio-222 – e têm emitido radiação desde antes que a Terra tivesse sua forma atual. O UNSCEAR calcula que cada pessoa ao redor do mundo receba anualmente, em média, uma dose efetiva de cerca de 0,48 mSv de exposição externa proveniente de fontes terrestres.

A exposição externa varia consideravelmente de um lugar para o outro. Estudos realizados na França, Alemanha, Itália, Japão e Estados Unidos, por exemplo, sugerem que cerca de 95% de suas respectivas populações vivem em áreas onde a dose média anual ao ar livre varia de 0,3 a 0,6 mSv. No entanto, em alguns lugares desses países as pessoas podem receber anualmente doses superiores a 1 mSv. Existem outros lugares no mundo onde a exposição à radiação proveniente de fontes terrestres é maior ainda. Por exemplo, na costa sudoeste de Kerala, Índia, uma faixa de terra de 55 km densamente povoada contém areia rica em Tório onde as pessoas recebem, em média, 3,8 mSv anualmente. Outras regiões com altos níveis de radiação proveniente de fontes terrestres naturais são conhecidas no Brasil, China, República Islâmica do Irã, Madagascar e Nigéria.

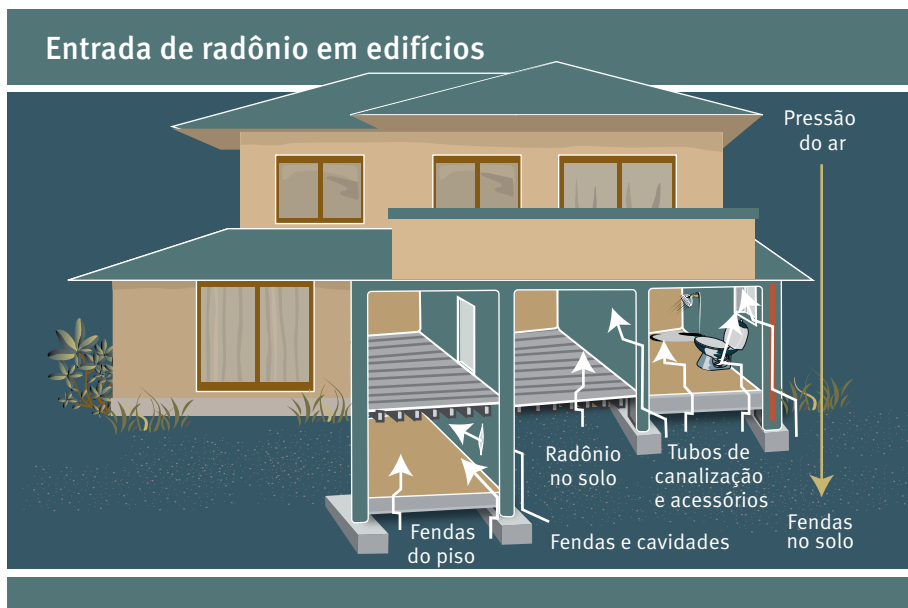
Gás radônio

O Radônio-222 é um radionuclídeo na forma de um gás que normalmente emana do solo. Ele é produzido pela série de decaimento do Urânio-238, presente nas rochas e no solo da Terra. Quando inalado, alguns dos produtos de decaimento de vida curta – principalmente Polônio-218 e Polônio-214 – são retidos nos pulmões e irradiam as células do trato respiratório com partículas alfa. O Radônio é, por isso, a causa primária de câncer no pulmão, tanto em fumantes quanto em não fumantes; no entanto, os fumantes são muito mais vulneráveis devido à forte interação entre o fumo e a exposição ao Radônio.

O Radônio está presente em todo lugar da atmosfera, e pode infiltrar-se diretamente nos edifícios, através de cavidades e do piso, onde sua concentração – quantidade de atividade em termos de decaimentos por tempo em um determinado volume de ar – pode se acumular. Principalmente quando as casas são aquecidas, o ar quente se eleva e escapa da casa por cima, através de janelas ou saídas de ar, o que gera uma baixa pressão no solo e no subsolo. Isso, por sua vez, causa a sucção do Radônio do subsolo através de rachaduras e fendas (p.ex. ao redor de entradas de tubulação) na parte inferior da casa.

A concentração média mundial de Radônio no interior de casas e de edifícios é de cerca de 50 Bq/m³. No entanto, essa média não reproduz a grande variabilidade de lugar para lugar. Em geral, as concentrações médias nacionais variam amplamente, de menos de 10 Bq/m³ em Chipre, Egito e Cuba, a mais de 100 Bq/m³ na República Tcheca, Finlândia e Luxemburgo. Em alguns países, como o Canadá, a Suécia e a Suíça, existem casas com concentrações de Radônio entre 1 000 e 10 000 Bq/m³. Porém, a proporção de casas com esses níveis de concentração tão elevados é pequena. Alguns dos fatores que causam essa variação são a geologia do local, a permeabilidade do solo, os materiais utilizados nas construções e a ventilação dos edifícios.

Em particular, a ventilação, que é dependente do clima, é um fator chave. Se os edifícios forem bem ventilados, assim como no clima tropical, é improvável que o acúmulo de Radônio seja substancial. No entanto, nos climas temperados ou frios, onde os lugares tendem a ser menos ventilados, as concentrações de Radônio podem se acumular consideravelmente. Assim, o efeito de uma ventilação restrita é importante para o projeto de edifícios energeticamente eficientes. Extensos programas de medidas têm sido conduzidos em muitos países, formando as bases para a implantação de medidas de redução das concentrações de Radônio no interior de construções.



O nível de Radônio na água é geralmente muito baixo, mas em algumas fontes de abastecimento – por exemplo, poços profundos em Helsínki, Finlândia, e em Hot Springs, Arkansas, Estados Unidos – possuem concentrações muito elevadas. Radônio na água pode contribuir para o aumento de concentração de Radônio no ar – particularmente no banheiro, durante o banho. Contudo, o UNSCEAR concluiu que a contribuição da dose de Radônio ingerida por meio da água potável é pequena em comparação à sua inalação. O UNSCEAR estima que a dose efetiva anual média proveniente do Radônio é de 1,3 mSv, representando cerca de metade do que a população recebe de todas as fontes naturais.

EXPOSIÇÃO EM LOCAIS DE TRABALHO

Para certos locais de trabalho, a inalação de gás Radônio domina sobre toda a exposição à radiação dos trabalhadores. Radônio é a principal fonte de exposição à radiação em todos os tipos de minas subterrâneas. A dose efetiva anual média para um mineiro de carvão é de cerca de 2,4 mSv e para outros mineiros, cerca de 3 mSv. Na indústria nuclear, a dose efetiva anual média para um trabalhador é de cerca de 1 mSv, principalmente devido à exposição ao Radônio na mineração do Urânio.

Fontes em alimentos e bebidas

Alimentos e bebidas podem conter radionuclídeos primitivos e de outros tipos, principalmente os provenientes de fontes naturais. Os radionuclídeos podem ser transferidos das rochas e minerais presentes no solo e na água para as plantas, seguindo depois para os animais. Assim, as doses variam dependendo das concentrações de radionuclídeos nos alimentos e na água, e dos hábitos alimentares locais.

Por exemplo, os peixes e os crustáceos possuem relativamente elevados níveis de Chumbo-210 e de Polônio-210; logo, as pessoas que comem grande quantidade de frutos do mar podem receber doses um pouco mais elevadas do que a população em geral. Comparativamente, doses mais elevadas são também recebidas por pessoas que vivem em regiões do Ártico e que consomem grande quantidade de carne de rena. As renas do Ártico contêm concentrações de Polônio-210 relativamente altas, acumuladas no líquen em que pastam. O UNSCEAR estima que a dose efetiva média resultante de fontes naturais em alimentos e bebidas seja de 0,3 mSv devido, principalmente, ao Potássio-40 e às séries de radionuclídeos do Urânio-238 e do Tório-232.

Radionuclídeos de fontes artificiais podem estar presentes em produtos alimentícios além dos provenientes de fontes naturais. No entanto, a contribuição na dose resultante de descargas controladas e autorizadas destes radionuclídeos para o ambiente é, geralmente, muito pequena.

3.2. Fontes artificiais

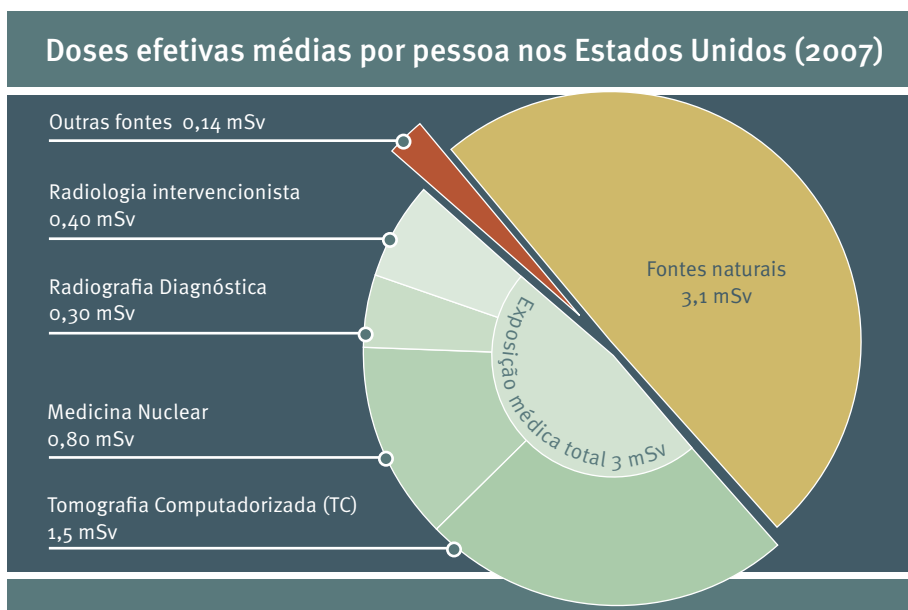
O uso da radiação tem aumentado significativamente durante as últimas décadas devido aos cientistas terem aprendido a usar a energia do átomo para diversas finalidades, de aplicações militares a médicas (p.ex. tratamento do câncer), na produção de eletricidade e em aplicações domésticas (p.ex. detectores de fumaça). As doses provenientes dessas e de outras fontes artificiais somam-se às

doses de radiação provenientes de fontes naturais, tanto individualmente quanto para a população global.

As doses individuais provenientes de fontes artificiais de radiação variam muito. A maioria das pessoas recebe uma dose relativamente pequena proveniente dessas fontes, mas alguns recebem doses muito superiores à média. As fontes artificiais de radiação são, geralmente, bem controladas por medidas de proteção à radiação.

Aplicações médicas

O uso da radiação em medicina para o diagnóstico e o tratamento de certas doenças desempenha um papel muito importante, sendo a principal fonte artificial de exposição no mundo. Em média, isso contribui em 98% da exposição à radiação de todas as fontes artificiais e, depois das naturais, é o segundo maior contribuinte para a exposição da população em todo o mundo, representando aproximadamente 20% do total. A maioria destas exposições ocorre em países industrializados, onde mais recursos para cuidados médicos estão disponíveis e, assim, equipamentos de radiologia são usados mais extensivamente. Em alguns países, o uso médico da radiação já tem resultado em uma dose efetiva anual média similar àquela proveniente de fontes naturais.



Existem diferenças substanciais entre a exposição médica e a maioria dos outros tipos de exposição. A exposição médica normalmente envolve apenas uma parte do corpo, enquanto a outra exposição frequentemente envolve o corpo todo.

Além disso, a distribuição etária dos pacientes normalmente envolve os com mais idade do que a distribuição da população em geral. Além do mais, doses resultantes da exposição médica devem ser comparadas com muito cuidado àquelas provenientes de outras fontes, considerando que os pacientes recebem um benefício direto dessa exposição.

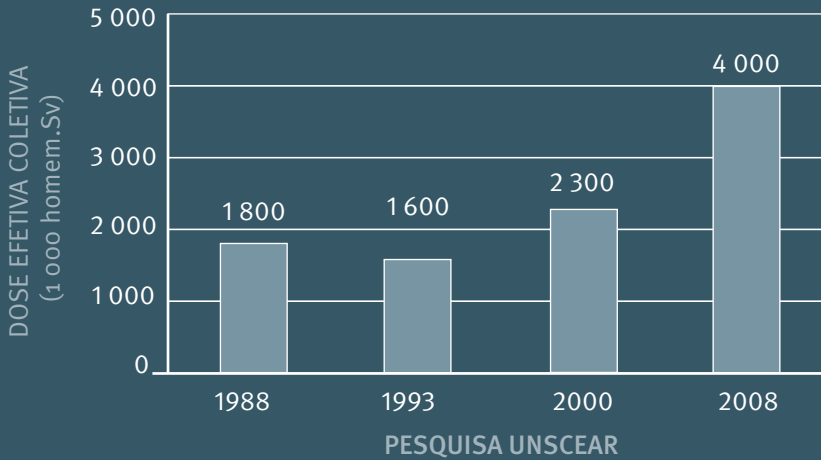
Com o aumento da urbanização associado com a melhoria gradual dos padrões de vida, inevitavelmente mais pessoas podem ter acesso à assistência em saúde. Como consequência, a dose da população proveniente da exposição médica continua a crescer em todo o mundo. O UNSCEAR tem coletado, regularmente, informações sobre procedimentos diagnósticos e terapêuticos. De acordo com o levantamento realizado no período de 1997-2007, cerca de 3,6 bilhões de procedimentos médicos com radiação foram realizados anualmente no mundo todo, comparados com 2,5 bilhões obtidos por uma pesquisa prévia para o período de 1991-1996, o que representa um aumento de cerca de 50%.

As categorias principais de práticas médicas que envolvem radiação são a radiologia (incluindo procedimentos intervencionistas), a medicina nuclear e a radioterapia. Outros usos não cobertos pelas avaliações regulares do UNSCEAR incluem programas médicos de rastreamento, e participação voluntária em programas de pesquisa médica, biomédica, diagnóstica ou terapêutica.

A *radiologia diagnóstica* é a análise de imagens obtidas usando raios X, tais como radiografias simples (p.ex. do tórax ou dentária), fluoroscopia (p.ex. contraste de bário ou enema) e tomografia computadorizada (TC). Modalidades de imagem que usam radiação não ionizante, como a ultrassonografia ou a ressonância magnética, não são abordadas pelo UNSCEAR. A *radiologia intervencionista* usa procedimentos minimamente invasivos, guiados por imagem, para diagnosticar e tratar doenças (p.ex. para guiar a inserção de um cateter em um vaso sanguíneo).

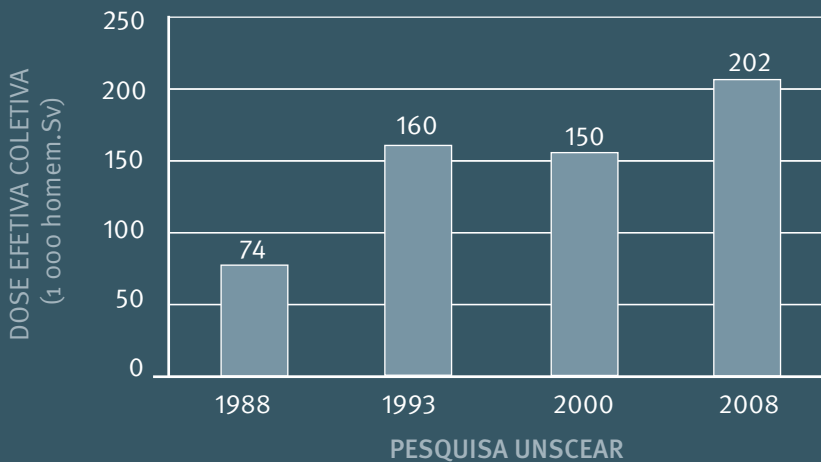
Devido ao amplo uso da TC e da dose significativa observada por exame, a dose efetiva média global de procedimentos de radiologia diagnóstica quase dobraram, de 0,35 mSv em 1988 para 0,62 mSv em 2007. De acordo com o último levantamento realizado pelo UNSCEAR, exames de TC contribuem atualmente com 43% da dose coletiva total proveniente da radiologia. Esses números variam de região para região. Cerca de dois terços de todos os procedimentos radiológicos são realizados em 25% da população mundial vivendo em países industrializados. Para os 75% restantes, a frequência anual de procedimentos permanece relativamente constante, mesmo para exames simples de raios X odontológicos.

Exposição mundial proveniente da Radiologia (1988-2008)



A **medicina nuclear** é a introdução de substâncias radioativas *não seladas* (isto é, solúveis e não encapsuladas) no corpo, principalmente para obter imagens que forneçam informações tanto sobre a estrutura quanto sobre a função dos órgãos e, menos comumente, para tratar certas doenças como o hipertireoidismo e o câncer de tireoide. Geralmente, um radionuclídeo é modificado para formar um

Exposição global proveniente da medicina nuclear (1988-2008)



radiofármaco que é geralmente administrado ao paciente por via intravenosa ou oral. A substância, assim, se dispersa pelo corpo do paciente de acordo com as características físicas e químicas, fazendo com que a análise seja possível. Dessa forma, a radiação emitida pelo radionuclídeo no interior do corpo é analisada para produzir o diagnóstico por imagem, ou é usada para tratar doenças.

O número de procedimentos de diagnóstico por medicina nuclear tem aumentado em todo o mundo, de cerca de 24 milhões em 1988, para cerca de 33 milhões em 2007. O resultado é um aumento significativo da dose efetiva coletiva anual de 74 000 para 202 000 homem.Sv. As aplicações terapêuticas na medicina nuclear moderna também está aumentando, alcançando cerca de 0,9 milhões de pacientes por ano em todo o mundo. Novamente, o uso da medicina nuclear é bastante desigual, com 90 % dos exames ocorrendo em países industrializados.

A **terapia por radiação** (também chamada **radioterapia**) usa a radiação para o tratamento de várias doenças, geralmente o câncer, mas também pode ser usada no tratamento de tumores benignos. A radioterapia externa refere-se ao tratamento em que uma fonte de radiação está fora do corpo do paciente, também chamada **teleterapia**. No tratamento, usa-se um equipamento contendo uma fonte altamente radioativa (geralmente Cobalto-60) ou um equipamento de alta voltagem que produz radiação (p.ex. um acelerador linear). O tratamento também pode ser realizado se colocando fontes radioativas encapsuladas dentro do corpo do paciente, por um período temporário ou permanente, sendo esse tipo de tratamento denominado **braquiterapia**.

Em todo o mundo, estima-se que 5,1 milhões de pacientes foram tratados anualmente com radioterapia durante o período de 1997-2007, número superior aos 4,3 milhões estimados em 1988. Cerca de 4,7 milhões de pacientes foram tratados por teleterapia e 0,4 milhão por braquiterapia. Os 25 % da população mundial que vivem em países industrializados receberam 70% de todo o tratamento por radioterapia, e 40% de todos os procedimentos de braquiterapia.

EXPOSIÇÃO EM LOCAIS DE TRABALHO

Devido ao crescimento significativo do número total de procedimentos médicos radiológicos nas últimas décadas houve, também, o crescimento do número de profissionais da saúde envolvidos na área, atualmente passando de 7 milhões, com uma dose efetiva anual média de cerca de 0,5 mSv por trabalhador. Na radiologia intervencionista e na medicina nuclear, os profissionais podem receber uma dose mais elevada do que a média.

Acidentes em aplicações médicas

Algumas aplicações médicas da radiação (p.ex. radioterapia, radiologia intervencionista e medicina nuclear) envolvem a entrega de altas doses aos pacientes. Quando aplicada incorretamente, a radiação pode causar danos sérios, ou até mesmo a morte. As pessoas em risco incluem não apenas os pacientes, mas também os médicos e qualquer outro profissional nas proximidades. A falha humana é considerada a causa mais comum nesses tipos de acidente. Os exemplos incluem a entrega errada da dose devido a erros no planejamento dos tratamentos, falhas no uso adequado do equipamento e exposição no órgão errado ou, ocasionalmente, no paciente errado.

Embora os acidentes graves com radioterapia sejam raros, mais de 100 já foram catalogados. O UNSCEAR revisou 29 desses, relatados desde 1967, que causaram 45 mortes e 613 lesões. No entanto, é provável que algumas mortes e muitas lesões não tenham sido comunicadas.

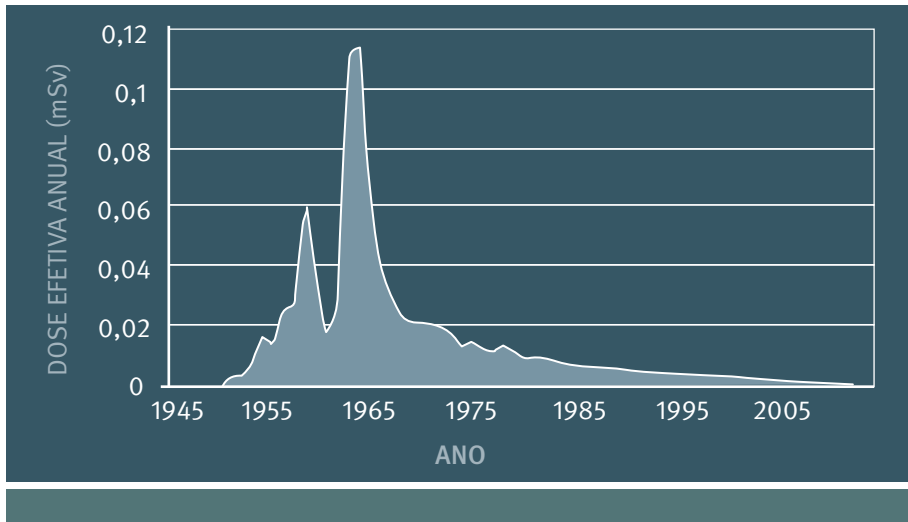
Não só a sobreexposição, mas também as subexposições podem causar graves consequências quando os pacientes recebem doses de radiação insuficientes para tratar doenças fatais. Programas de garantia da qualidade ajudam a manter padrões de execução elevados e consistentes, a fim de minimizar o risco desses tipos de acidente.

Armas nucleares

Em 1945, durante o período final da Segunda Guerra Mundial, duas bombas atômicas foram lançadas em cidades japonesas – Hiroshima em 6 de agosto e Nagasaki em 9 de agosto. A explosão de ambas matou, aproximadamente, 130 000 pessoas. Esses eventos permanecem como o único uso na história de armas nucleares para a guerra. No entanto, após 1945, muitas armas nucleares foram testadas na atmosfera, principalmente no Hemisfério Norte. O período de testes mais ativo foi entre 1952 e 1962. Ao todo, mais de 500 testes foram realizados, com um rendimento total equivalente a 430 megatons de trinitrotolueno (TNT), sendo o último em 1980. As pessoas ao redor do mundo foram expostas à radiação devido a partículas radioativas na atmosfera (fallout) resultantes desses testes. Em resposta ao receio sobre a exposição à radiação em humanos e no meio ambiente, o UNSCEAR foi fundado, em 1955.

A dose efetiva anual média estimada devida a partículas radioativas na atmosfera proveniente de testes com armas nucleares foi a mais elevada em 1963, atingindo 0,11 mSv, e caindo, subsequentemente, para o valor atual de cerca de 0,005 mSv. Essa exposição diminuirá muito lentamente no futuro porque a maioria desta é devida ao radionuclídeo de vida longa Carbono-14.

Dose média mundial por pessoa a partir de precipitação proveniente de testes nucleares (fallout)



Cerca de 50 % das partículas radioativas totais produzidas por testes em superfície foram depositadas localmente, dentro de cerca de 100 km do local dos testes. As pessoas que vivem próximas a estes lugares foram expostas, sobretudo, às partículas localmente depositadas. Contudo, como os testes foram realizados em áreas relativamente remotas, as populações locais expostas foram pequenas e não contribuem, significativamente, para a dose coletiva global. Em contrapartida, as pessoas que vivem em regiões na direção do vento dos locais de teste receberam doses muito maiores que a média.

O primeiro relatório do UNSCEAR, em 1958, estabeleceu as bases científicas nas quais o *Tratado de Proibição de Testes com Armas Nucleares na Atmosfera, Espaço Sideral e Subaquático* foi negociado. Após a assinatura do Tratado de Proibição de Testes Parcial em 1963, cerca de 50 testes subterrâneos foram conduzidos anualmente até a década de 1990; alguns poucos testes também foram realizados após essa data. A maioria desses teve um rendimento nuclear muito menor do que os testes na atmosfera, e os resíduos radioativos foram contidos, exceto quando gases foram ventilados ou vazados para a atmosfera. Embora os testes gerassem grande quantidade de resíduos radioativos, não era esperado que houvesse exposição do público, porque estes foram realizados em grandes profundidades e todo o material se fundiu às rochas.

Há uma preocupação a respeito do reuso das áreas utilizadas para testes nucleares (p.ex. pastagem de animais ou plantações) porque algumas estão sendo reocupadas. As doses provenientes de resíduos radioativos de alguns locais como, por exemplo, áreas localizadas na região de testes Semipalatinsk, no atualmente

Cazaquistão, podem ser consideráveis, enquanto em outras regiões, tais como os atóis de Mururoa e Fangataufa, na Polinésia Francesa, as doses contribuiriam apenas com uma parcela dos valores de exposição ambientais normais para uma população que eventualmente ocupasse aquele local. Para outros locais, como as Ilhas Marshall e Maralinga, onde os Estados Unidos e Reino Unido, respectivamente, realizaram alguns outros testes, a exposição da população que vive nestas regiões dependeria da dieta e do estilo de vida.

Reatores nucleares

Quando certos isótopos do Urânio ou do Plutônio são atingidos por nêutrons, o núcleo se divide em dois núcleos menores por um processo denominado de fissão nuclear, liberando energia, além de dois ou mais nêutrons. Os nêutrons liberados podem atingir outros núcleos de Urânio ou Plutônio, causando divisão e liberando outros nêutrons e, assim, sucessivamente. O processo é chamado de reação em cadeia. Esses isótopos são normalmente utilizados como combustível em reatores nucleares, onde a reação em cadeia é controlada para evitar que ocorra muito rapidamente.

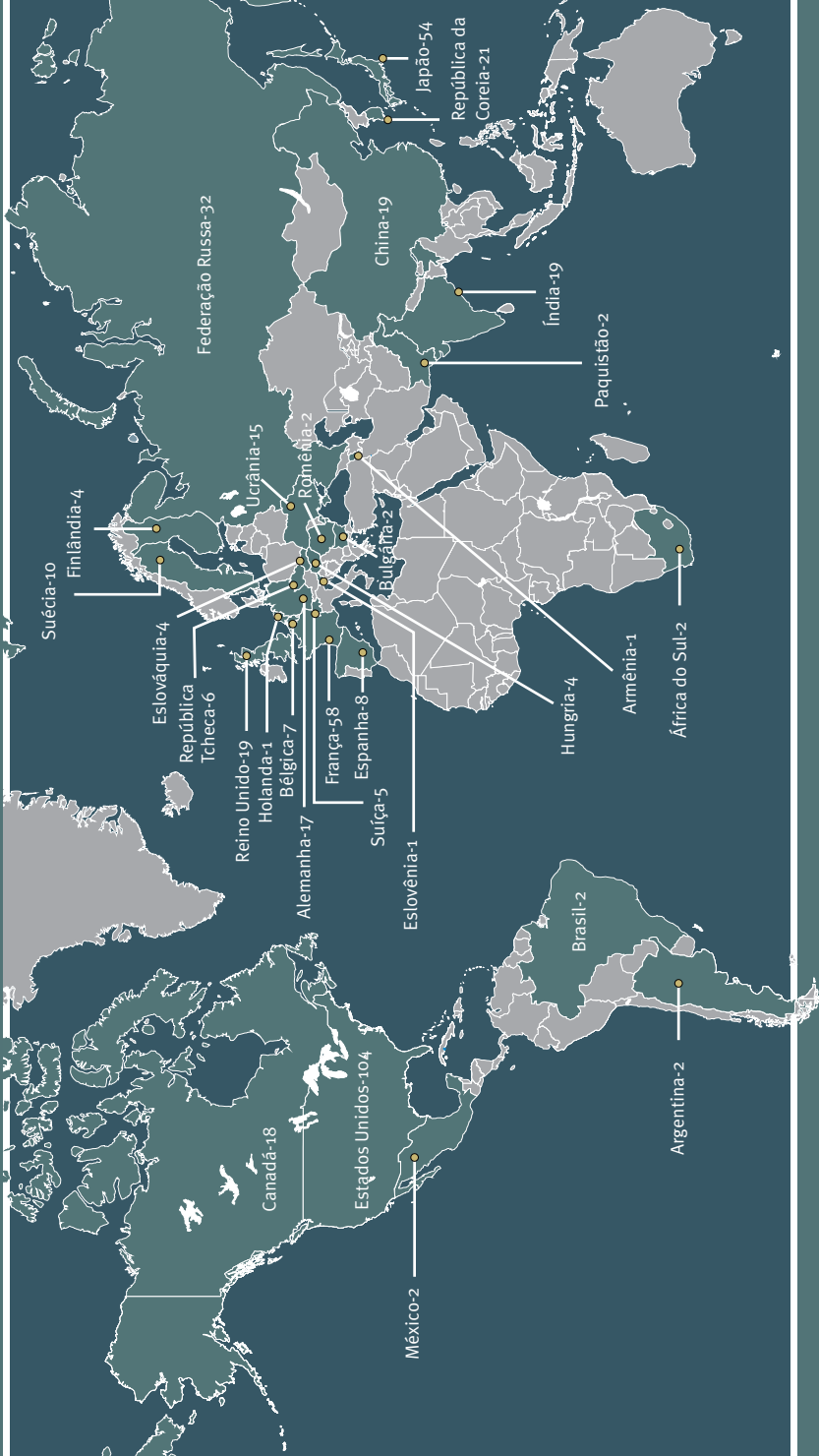
A energia liberada pela fissão nos reatores nucleares pode ser usada para gerar eletricidade em usinas nucleares. No entanto, existem também os reatores de pesquisa, utilizados para testes de combustível nuclear e de diversos tipos de materiais, estudos em física nuclear e biologia e, ainda, para a produção de radio-nuclídeos a serem utilizados na medicina e na indústria. Apesar das diferenças entre os dois tipos de reatores, ambos requerem processos industriais, tais como mineração de Urânio e disposição de resíduos radioativos, o que pode resultar em exposição ocupacional e do público.

Usinas de energia nuclear

A primeira usina comercial de energia nuclear em escala industrial, Calder Hall, foi construída em 1956 no Reino Unido e, desde então, a geração de energia elétrica em usinas nucleares tem crescido consideravelmente. Apesar do aumento da desativação (descomissionamento) de reatores antigos, a produção de energia elétrica produzida por fontes nucleares continua a crescer. No final de 2010, cerca de 440 reatores de energia estavam em operação em 29 países, fornecendo cerca de 10% da geração de eletricidade global, e 240 reatores de pesquisa estavam espalhados em 56 países.

Apesar da produção de eletricidade pelo uso da energia nuclear ser frequentemente controversa, em condições normais de operação, esta contribui muito pouco na exposição global à radiação. Além disso, os níveis de exposição à radiação variam muito de um tipo de instalação para outra, entre diferentes localidades e ao longo do tempo.

Usinas Nucleares no mundo (2010)



Os níveis globais de exposição devido à descargas normais de reatores têm diminuído, apesar do aumento da produção de energia dessas usinas. Isso é parcialmente devido aos avanços tecnológicos, e em parte devido a medidas mais rigorosas de proteção contra a radiação. Em geral, as descargas das instalações nucleares geram doses de radiação muito baixas. A dose coletiva anual para as populações em torno das usinas nucleares é estimada em 75 homem.Sv. Assim, uma pessoa que vive nas vizinhanças de uma usina nuclear é exposta a uma dose efetiva anual média de cerca de 0,0001 mSv.

A componente dominante para a exposição à radiação proveniente de operações nucleares é a mineração. A mineração e trituração do Urânio produzem quantidades substanciais de resíduos na forma de rejeitos que contêm níveis elevados de radionuclídeos naturais. Em 2003, a produção mundial total de Urânio alcançou cerca de dois milhões de toneladas, enquanto os rejeitos resultantes superaram dois bilhões de toneladas. Atualmente, as pilhas de rejeitos são bem mantidas, mas existem locais antigos e abandonados, e somente poucos destes foram remediados. O UNSCEAR estimou que a dose coletiva anual para a grupos de população ao redor de locais de mineração, trituração e armazenamento de rejeitos é de cerca de 50-60 homem.Sv.

Os combustíveis irradiados dos reatores podem ser reprocessados para a recuperação do Urânio e do Plutônio para reuso. A maior parte do combustível irradiado é guardada em armazéns provisórios, mas cerca de um terço do que é produzido tem sido reprocessado. A dose coletiva anual devido ao reprocessamento é estimada em uma faixa de 20 a 30 homem.Sv.

Rejeitos de baixo nível de radiação e alguns de nível intermediário são atualmente armazenados em instalações próximas à superfície embora, no passado, os rejeitos fossem algumas vezes depositados no mar. Tanto os rejeitos de alto nível de radiação provenientes de reprocessamento, quanto os dos combustíveis irradiados (se não reprocessados) são armazenados, mas eventualmente precisarão ser descartados. O descarte adequado não pode gerar exposição para as pessoas, mesmo em um futuro distante.

EXPOSIÇÃO EM LOCAIS DE TRABALHO

Na indústria nuclear, a liberação de Radônio nas minas subterrâneas de Urânio contribui substancialmente para a exposição ocupacional. A extração e processamento de minérios radioativos que podem conter altos níveis de radionuclídeos é uma atividade muito difundida. A dose efetiva anual média por trabalhador na indústria nuclear tem diminuído gradualmente desde os anos 1970, passando de 4,4 mSv para 1 mSv atualmente. Isso ocorre, principalmente, devido à redução significativa da mineração de Urânio, além do uso de técnicas mais avançadas de mineração e de ventilação.

Principais processos na indústria nuclear

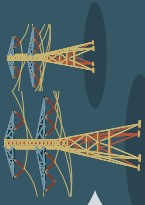
Conversão, enriquecimento e refinamento preparam o Urânio para uso como combustível.



Fabricação de combustível produz barras de combustível, geralmente de Urânio em pastilhas cerâmicas, envolvidas em tubos metálicos.



Reatores de pesquisa e de produção de energia, onde os núcleos de átomos de Urânio se dividem (fissão) e liberam energia utilizada para aquecer a água.



Reprocessamento de Urânio e de Plutônio do combustível usado pode ser reciclado como combustível após conversão e enriquecimento.

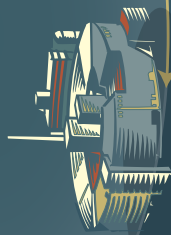
Mineradoras extraem o Urânio a partir do minério. Os resíduos tornam-se rejeitos contendo radionuclídeos de vida longa em baixas concentrações.



Radioisótopos produzidos no reator podem ser separados para uso em medicina e indústria.



Subprodutos radioativos tomam o combustível menos eficiente. Depois de 12-24 meses o **combustível gasto** é retirado do reator.



Rejeitos de alto nível incluindo combustível usado estão atualmente em situação de armazenamento provisório dependentes de disposição final em sítios geológicos profundos.



Rejeitos de nível intermediário e de baixo nível são depositados em locais de pouca profundidade.



Pequena profundidade e profundidade intermediária



O **Urânio natural** é extraído principalmente por poços abertos ou mineração subterrânea.



Acidentes em instalações nucleares

Os níveis de exposição durante a operação normal de instalações civis da indústria nuclear são muito baixos. No entanto, tem havido alguns acidentes graves que receberam extensiva atenção do público e cujas consequências têm sido avaliadas pelo UNSCEAR. Os exemplos incluem a instalação de pesquisa de Vinca, na antiga Iugoslávia em 1958, a usina nuclear de Three Mile Island, nos Estados Unidos em 1979, e a instalação de conversão de combustível de Tokai-Mura, no Japão em 1999.

Trinta e cinco acidentes graves com radiação em instalações nucleares entre 1945 e 2007 resultaram em mortes ou lesões sérias em trabalhadores e sete acidentes causaram vazamentos de material radioativo e detecção de exposição da população. Houve outros acidentes graves em instalações relacionadas aos programas de armas nucleares. Excluindo-se os acidentes de Chernobyl, em 1986, e Fukushima-Daiichi, em 2011, que serão discutidos a seguir, 32 mortes e 61 casos de lesões relacionadas à radiação que necessitaram de cuidados médicos são conhecidos.

O acidente mais sério em uma instalação civil antes do acidente de Chernobyl foi o da usina nuclear de Three Mile Island, em 28 de março de 1979. Uma série de eventos levou à fusão parcial do núcleo do reator. Esse acidente liberou grandes quantidades de produtos de fissão e radionuclídeos provenientes de falha no núcleo do reator no prédio de contenção; porém, foi lançada relativamente pouca quantidade no meio ambiente, fazendo com que a exposição do público fosse muito baixa.

Acidente na Usina Nuclear de Chernobyl

O acidente na usina nuclear de Chernobyl em 26 de abril de 1986 não foi apenas o mais grave da história da energia nuclear civil, mas também o mais grave em termos de exposição à radiação da população em geral. A dose coletiva proveniente deste acidente foi muitas vezes maior que a combinação das doses coletivas de todos os outros acidentes com radiação.

Dois trabalhadores morreram de trauma no momento da explosão e 134 sofreram a síndrome aguda da radiação, o que provocou a morte de 28 destes. Lesões na pele e catarata relacionadas à radiação estão entre os principais problemas entre os sobreviventes. Além dos trabalhadores das equipes de emergência, centenas de milhares de pessoas foram envolvidas em operações de resgate. Exceto pelo aumento aparente da ocorrência de leucemia e de catarata entre aqueles que receberam doses elevadas em 1986 e 1987, não há evidência consistente, até o momento, de outros efeitos à saúde relacionados com a radiação nesse grupo.

O acidente causou a mais descontrolada liberação de radiação para o meio ambiente já registrada em qualquer operação civil; grandes quantidades de substâncias radioativas foram lançadas na atmosfera por cerca de 10 dias. A nuvem radioativa criada pelo acidente se dispersou por todo o Hemisfério Norte e depositou quantidades substanciais de material radioativo sobre extensas áreas da antiga União Soviética e em outras partes da Europa, contaminando o solo e a água, principalmente na atual Bielorrússia, na Federação Russa e na Ucrânia, causando uma grave crise social e econômica em grandes segmentos da população.

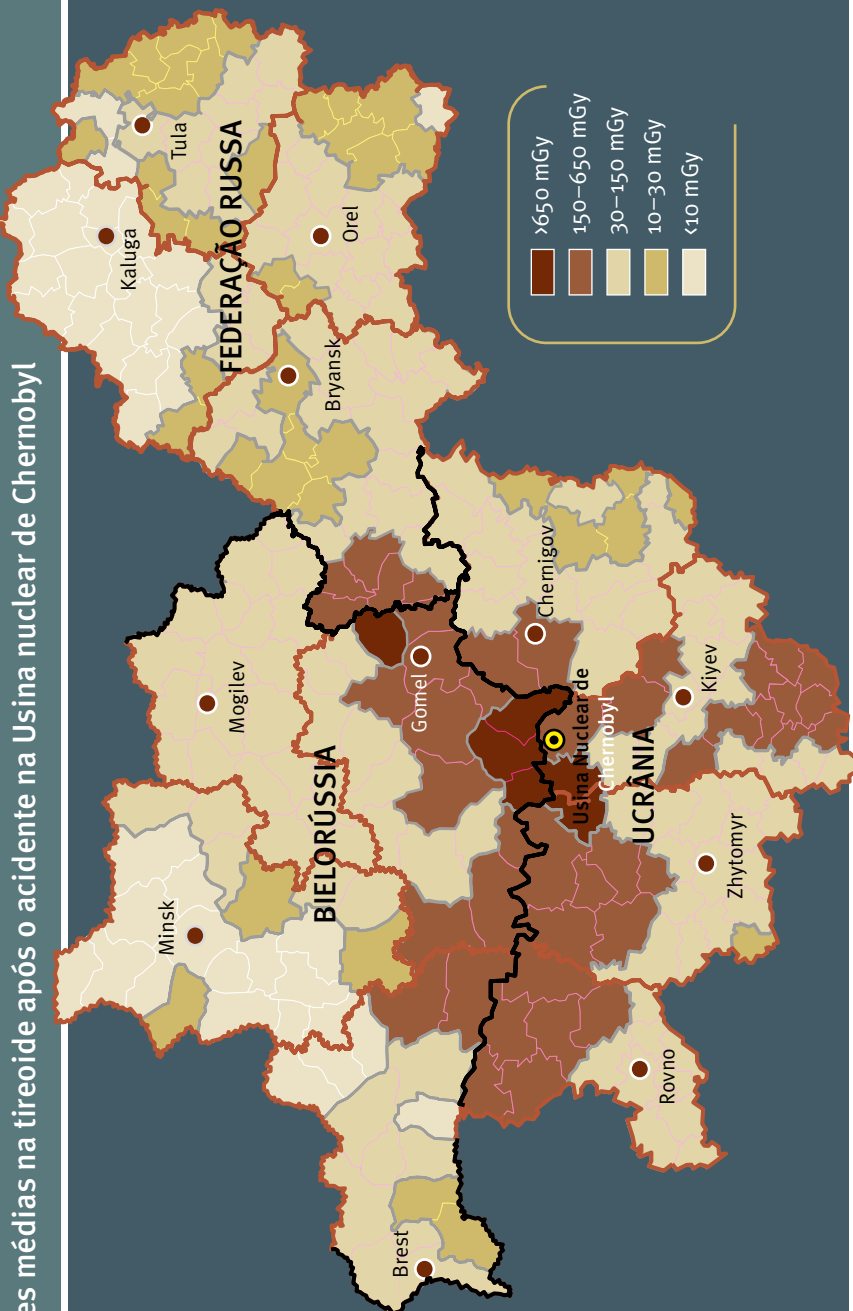
A contaminação do leite fresco com o radionuclídeo de vida curta Iodo-131 (com meia-vida de oito dias) e a falta de contramedidas rápidas levaram a doses elevadas na tireoide, particularmente das crianças, em diversas partes da extinta União Soviética. Desde o início dos anos 1990, a ocorrência de câncer de tireoide entre os indivíduos expostos quando crianças e adolescentes em 1986 têm aumentado na Bielorrússia, na Ucrânia e em outras quatro regiões mais afetadas da Federação Russa. No período de 1991-2005, mais de 6 000 casos têm sido reportados, dentre os quais 15 foram fatais.

Em longo prazo, a população em geral foi também exposta à radiação, tanto externamente pelos resíduos radioativos depositados, quanto internamente pelo consumo de alimentos contaminados, principalmente por Césio-137 (com meia-vida de 30 anos). No entanto, as doses de radiação de longo prazo resultantes foram relativamente baixas, a dose efetiva individual média no período de 1986-2005 nas áreas contaminadas da Bielorrússia, Federação Russa e Ucrânia foi de 9 mSv. Essa dose não deve causar grandes efeitos à saúde na população em geral. Entretanto, os graves problemas gerados pelo acidente resultaram em grande impacto social e econômico, além de muito sofrimento para as populações afetadas.

O UNSCEAR estudou em detalhes as consequências radiológicas do acidente através de diversos relatórios. A comunidade internacional tem feito esforços sem precedentes para estimar a magnitude e as características das consequências do acidente de uma forma geral, e com foco em diferentes áreas, a fim de ampliar o conhecimento das consequências radiológicas do acidente, entre outras, auxiliando na mitigação das mesmas.

Essencialmente, estudos realizados desde 1986 indicam que os indivíduos expostos ao Iodo-131 na infância, e os profissionais de emergência e de operações de resgate que receberam doses elevadas de radiação possuem maior risco dos efeitos induzidos por radiação. No entanto, a maioria dos residentes da região foi exposta a baixos níveis de radiação comparáveis a, ou algumas vezes maior do que, os níveis anuais de radiação natural.

Doses médias na tireoide após o acidente na Usina nuclear de Chernobyl



Acidente na Usina Nuclear de Fukushima-Daiichi

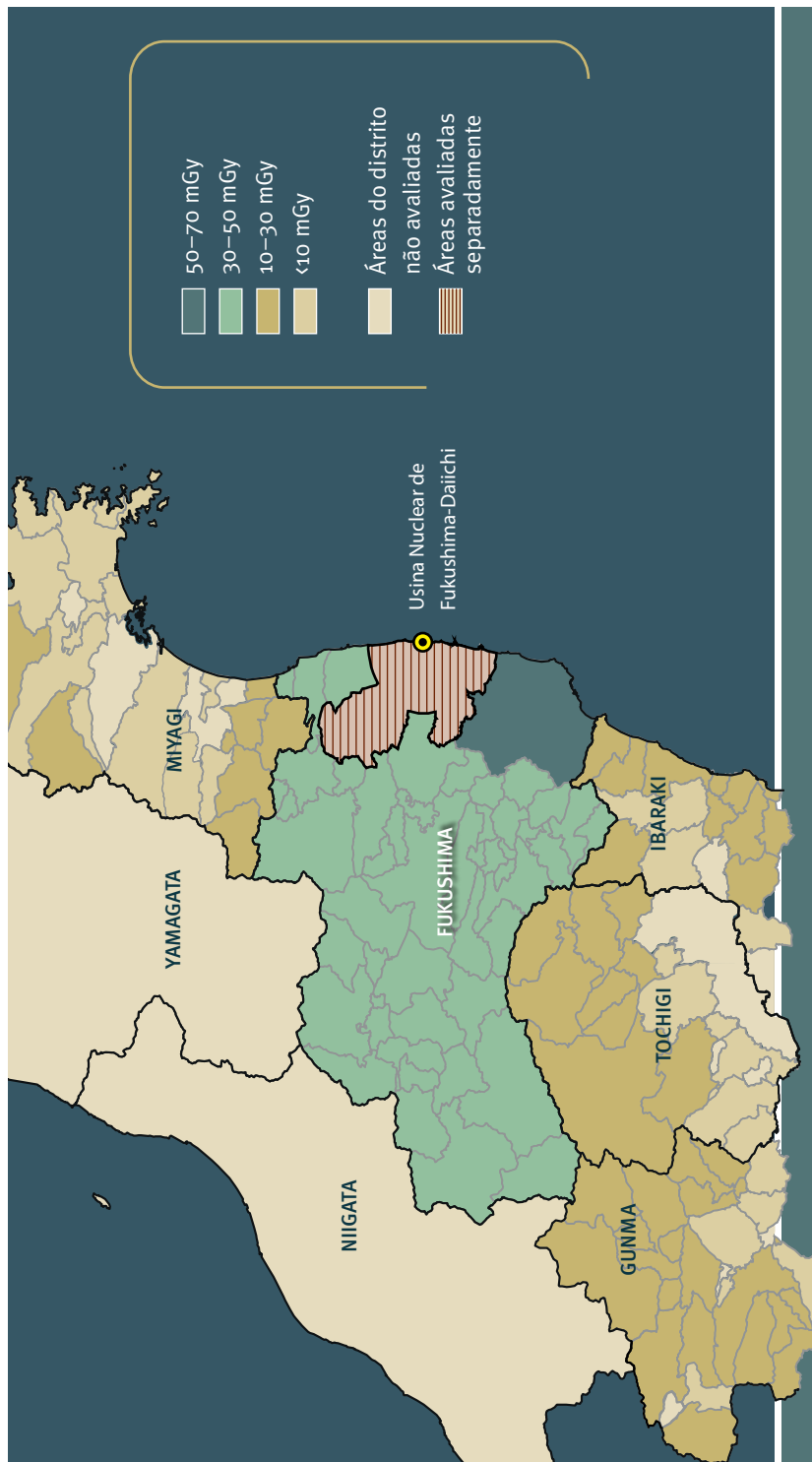
Depois do grande terremoto de magnitude 9.0 e do tsunami ao norte da costa leste do Japão em 11 de março de 2011, a usina nuclear de Fukushima-Daiichi foi severamente danificada e material radioativo foi liberado para o meio ambiente. Aproximadamente 85 000 moradores, dentro de uma área de 20 km ao redor da usina nuclear e algumas áreas próximas, foram evacuados entre 11 e 15 de março como medida preventiva, enquanto que os que moravam a uma distância de 20 a 30 km da usina foram asilados em suas próprias casas. Mais tarde, em abril de 2011, foi recomendada a evacuação de outras 10 000 pessoas que viviam um pouco mais distante da região noroeste da usina devido a elevados níveis de radionuclídeos no solo. Essas evacuações reduziram bastante os níveis de exposição que todos os afetados poderiam ter recebido. O consumo de água e de certos alimentos foi temporariamente restrito para limitar a exposição à radiação do público. Para poder administrar a situação de emergência na usina nuclear, alguns funcionários operacionais e pessoas da equipe de emergência foram expostos.

O UNSCEAR conduziu uma avaliação das doses de radiação e efeitos associados à saúde e ao meio ambiente. Cerca de 25 000 trabalhadores foram envolvidos na mitigação e em outras atividades no local da usina Fukushima-Daiichi durante o primeiro ano e meio após o acidente. A dose efetiva média para os trabalhadores na época foi de cerca de 12 mSv. No entanto, 6 trabalhadores receberam doses totais acumuladas acima de 250 mSv; a maior dose total registrada foi 680 mSv recebida por um trabalhador principalmente por exposição interna (cerca de 90%). Estimou-se que doze trabalhadores tenham recebido doses na tireoide na faixa de 2 a 12 Gy. Nenhuma morte relacionada à radiação ou a doenças agudas foi observada entre os trabalhadores expostos à radiação no acidente.

As doses efetivas médias para os adultos nas áreas evacuadas do Município de Fukushima variou de 1 mSv a cerca de 10 mSv, no primeiro ano após o acidente. As doses efetivas para crianças até um ano de idade foram estimadas como sendo cerca de duas vezes mais elevadas. Para as áreas não evacuadas do município de Fukushima e de outros municípios vizinhos, as doses foram menores.

Estimativas das doses médias recebidas na tireoide, principalmente devido ao Iodo-131, entre aqueles mais expostos variou de 35 mGy para adultos e até 80 mGy para crianças de um ano de idade. A dose anual na tireoide, principalmente devido a fontes externas de radiação natural, foi tipicamente da ordem de 1 mGy. O UNSCEAR concluiu uma possibilidade teórica de aumento do risco de câncer de tireoide entre o grupo de crianças mais expostas à radiação. Contudo, o câncer de tireoide é uma doença rara entre crianças jovens e, por isso, estatisticamente não são esperados efeitos observáveis no grupo.

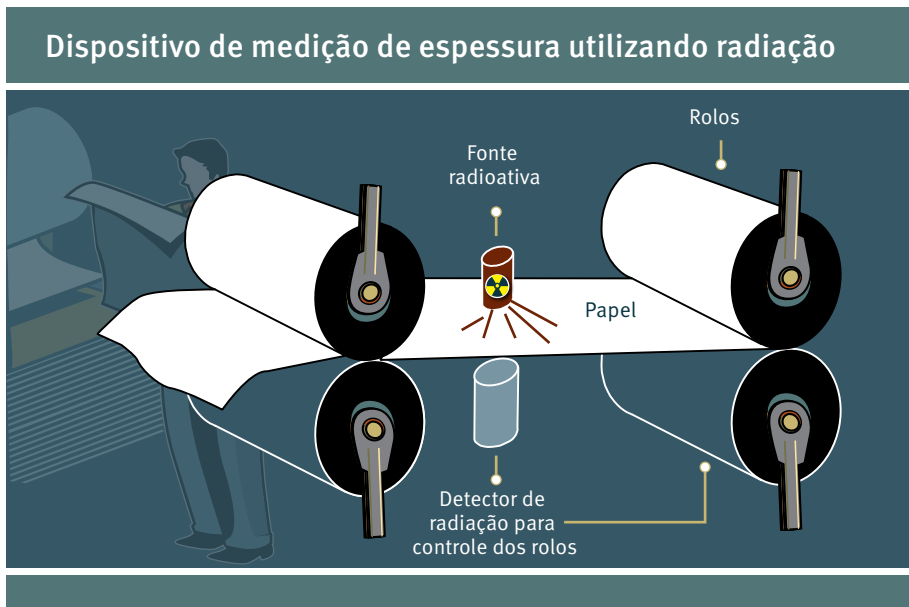
Doses médias na tireoide para crianças após o acidente da Usina nuclear de Fukushima-Daiichi



Embora comparações sejam feitas com o desastre de Chernobyl, o acidente nuclear de Fukushima-Daiichi certamente foi diferente em termos de tipo de reator, a forma como o acidente aconteceu, as características da liberação e da dispersão dos radionuclídeos, e as ações de proteção tomadas. Em ambos os acidentes, grandes quantidades de Iodo-131 e Césio-137 – os dois radionuclídeos mais importantes na perspectiva de exposição após acidentes nucleares – foram lançadas no meio ambiente. A liberação de Iodo-131 e Césio-137 no acidente de Fukushima-Daiichi comparado com o de Chernobyl foi cerca de 10% e de 20%, respectivamente.

Aplicações industriais e outras

As fontes de radiação são utilizadas em muitas aplicações industriais. Essas aplicações incluem irradiação industrial para esterilização de produtos médicos e farmacêuticos, preservação de produtos alimentícios ou eliminação de infestação de insetos; radiografia industrial utilizada no exame de defeitos em juntas metálicas soldadas; emissores alfa ou beta usados em compostos luminosos de miras de armas tanto quanto em fontes de luz de baixo nível, indicadores de saída e mapas luminosos; fontes radioativas ou máquinas de raios X em miniatura usadas em perfilagem para medir características geológicas de poços perfurados para exploração de minerais, óleo ou gás; fontes radioativas usadas em dispositivos para medir espessura, umidade, densidade e nível de materiais, além de outras fontes radioativas seladas usadas em pesquisa.



Embora generalizada, a produção de radionuclídeos para uso em práticas industriais e médicas causam níveis muito baixos de exposição ao público em geral. No entanto, no caso de acidentes, mais áreas específicas podem ser contaminadas, dando origem a altos níveis de exposição.

EXPOSIÇÃO EM LOCAIS DE TRABALHO

O número de profissionais envolvidos no uso industrial da radiação era cerca de um milhão no início dos anos 2000, com uma dose efetiva anual média por trabalhador de 0,3 mSv.

Material radiativo de ocorrência natural

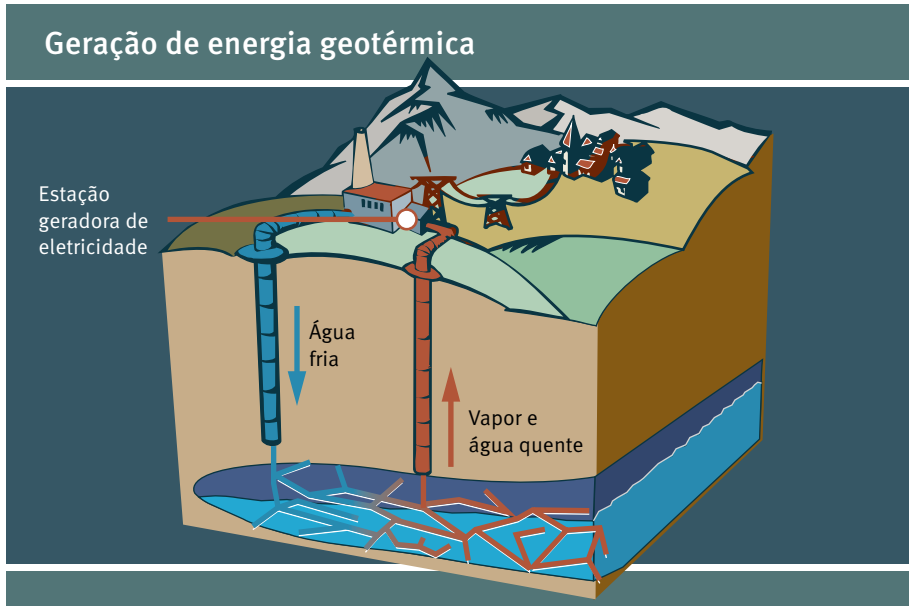
Existem diversos tipos de instalações ao redor do mundo que, embora não relacionadas ao uso da energia nuclear, podem expor a população à radiação devido ao aumento das concentrações de *materiais radiativos de ocorrência natural* (do inglês *naturally occurring radioactive material - NORM*) em seus produtos, subprodutos e resíduos. As instalações mais importantes desse tipo envolvem a mineração e o processamento mineral.

Atividades relacionadas com a extração e o processamento de rochas podem também levar ao aumento dos níveis de NORM. Essas atividades incluem mineração e fundição de metais; produção de fosfato; mineração de carvão e queima de carvão para a produção de energia; exploração de óleo e gás; indústrias que processam terras raras e óxido de titânio; indústrias de produção de zircônio e de materiais cerâmicos; e aplicações que utilizam radionuclídeos que ocorrem naturalmente (tipicamente isótopos de Rádio e Tório).

O carvão, por exemplo, contém traços de radionuclídeos primitivos. A queima libera os radionuclídeos para o meio ambiente, onde podem expor pessoas. Isto significa que para cada gigawatt ano de energia produzida em termelétricas movidas a carvão ao redor do mundo, é estimado que a dose coletiva da população mundial aumente cerca de 20 homem.Sv a cada ano. Adicionalmente, as cinzas (resíduo gerado na combustão) têm sido usadas em aterros e na construção de rodovias; porém, o uso na construção de edifícios resulta na exposição à radiação, tanto de modo direto quanto por inalação de Radônio. Além disso, o descarte das cinzas pode aumentar os níveis de exposição à radiação ao redor dos locais de despejo.

A geração de energia geotérmica é outra fonte de exposição à radiação para o público em geral. Reservatórios subterrâneos de vapor e de água quente são drenados para a geração de eletricidade ou para aquecimento em edifícios.

Estimativas das emissões pelo uso de tal tecnologia na Itália e nos Estados Unidos sugere que as instalações geotérmicas produzem cerca de 10% da dose coletiva por gigawatt ano de eletricidade produzida pelas termelétricas movidas a carvão. A energia geotérmica tem atualmente uma contribuição relativamente pequena na produção da energia mundial e, assim, para exposição à radiação.



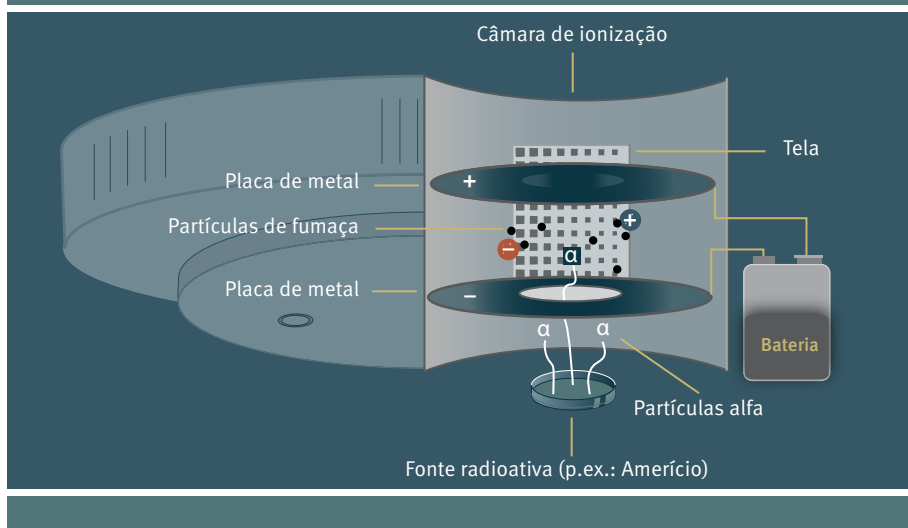
Diversas outras atividades humanas podem expor as pessoas ao NORM, como o lodo gerado no tratamento de água e utilizado na agricultura. No entanto, os níveis de exposição para o público são extremamente baixos, na ordem de menos de poucos milésimos de milisievert, anualmente.

Um subproduto do enriquecimento do Urânio é o Urânio empobrecido ou exaurido, que é menos radioativo que o Urânio natural. O Urânio empobrecido tem sido utilizado tanto em atividades civis quanto em militares por muitos anos. Devido à sua alta densidade, esse é utilizado em sistemas blindagem da radiação e como contrapeso em aeronaves. O uso militar do Urânio empobrecido, especialmente em munições perfurantes, tem aumentado a preocupação quanto à contaminação residual. Exceto por alguns poucos cenários específicos como a manipulação em longo prazo, a exposição à radiação pelo Urânio empobrecido é extremamente baixa. De fato, a toxicidade química é sua propriedade mais perigosa.

Produtos de Consumo

Diversos produtos vendidos diariamente podem conter baixos níveis de radionuclídeos, adicionados deliberadamente a fim de fazer uso de suas propriedades químicas ou radioativas. Historicamente, o radionuclídeo mais importante usado em produtos luminosos foi o Rádio-226. Seu uso foi suspenso décadas atrás, sendo o substituído pelo Promécio-147 e pelo Hidrogênio-3 (Trítio), que são menos radiotóxicos. Ainda assim, para relógios que contenham compostos de Trítio, alguns vazamentos de Trítio podem ocorrer por serem equipamentos portáteis. No entanto, o Trítio emite apenas partículas beta fracas que não podem penetrar na pele; assim, as pessoas serão expostas apenas se o Trítio entrar no corpo.

Funcionamento de detectores de fumaça que utilizam radiação



Alguns detectores de fumaça modernos consistem em câmaras de ionização com pequenas lâminas de Amerício-241, que emitem partículas alfa e produzem uma corrente iônica constante. O ar ambiente circula livremente no detector, mas quando a fumaça entra nesse detector interrompe a corrente, disparando o alarme.

A radioatividade da fonte de Amerício em um detector de fumaça é muito baixa. Ela decai muito lentamente, com uma meia-vida de cerca de 432 anos. Isso significa que o detector – ao final de 10 anos de uso – conserva essencialmente toda a atividade original. Enquanto a fonte de Amerício estiver no detector, o nível de exposição é desprezível. Apesar de detectável por equipamentos sensíveis, os níveis de exposição recebidos por esses equipamentos são extremamente baixos. Um indivíduo que permaneça a dois metros de distância de um detector de fumaça por oito horas por dia recebe uma dose menor que 0,0001 mSv por ano.

Acidentes Industriais

Acidentes envolvendo fontes de radiação industriais ocorrem com mais frequência do que os em usinas nucleares. Todavia, esses não recebem normalmente muita atenção, apesar de poderem causar exposição extensiva à radiação para ambos, trabalhadores e membros do público.

Entre 1945 e 2007, cerca de 80 acidentes foram registrados em instalações industriais que utilizam fontes radioativas, aceleradores de partículas e dispositivos de raios X. Nove mortes foram reportadas nesses acidentes e 120 trabalhadores sofreram lesões. Alguns trabalhadores machucados desenvolveram a síndrome aguda da radiação. As mãos foram uma parte do corpo comumente lesionada e frequentemente tiveram que ser amputadas. O UNSCEAR considera a possibilidade de que alguns acidentes em instalações industriais envolvendo mortes e lesões não tenham sido registrados.

As causas e efeitos dos acidentes são muitas e variadas. Apenas dois exemplos são apresentados aqui. Em 1978, em Louisiana, nos Estados Unidos, um técnico em radiografia industrial trabalhando em uma barca sofreu uma lesão por radiação com uma fonte de Iridio-192 de 3,7 TBq na mão esquerda, provavelmente devido ao mau funcionamento do dosímetro. Cerca de três semanas depois, sua mão estava vermelha e inchada, posteriormente apresentando bolhas na pele que cicatrizaram em 5 a 8 semanas. Seis meses depois, no entanto, o dedo indicador teve que ser parcialmente amputado. Logo depois, em 1990, em Shanghai, na China, devido a medidas de segurança inadequadas, sete trabalhadores foram expostos à radiação por uma fonte de Cobalto-60 em uma instalação industrial. Um trabalhador, que recebeu uma dose estimada de 12 Gy, morreu 25 dias depois da exposição. Um segundo trabalhador, cuja dose foi estimada em 11 Gy, morreu 90 dias após a exposição. Os outros cinco trabalhadores que receberam doses estimadas em 2 a 5 Gy recuperaram-se após tratamento médico.

Fontes órfãs

Entre 1966 e 2007, 31 acidentes foram atribuídos a fontes radioativas perdidas, roubadas ou abandonadas, também conhecidas como *fontes órfãs*. Esses acidentes resultaram na morte de 42 de membros do público, incluindo crianças. Além disso, os acidentes causaram a síndrome aguda da radiação, lesões locais severas, contaminação interna, ou problemas psicológicos que necessitaram de cuidados médicos em centenas de pessoas. Seis acidentes foram associados com unidades abandonadas de radioterapia.

O número exato de fontes órfãs existentes no mundo não é conhecido, mas estima-se que sejam milhares. A Comissão Regulatória Nuclear dos Estados Unidos relata

que empresas que atuam nos Estados Unidos perderam o controle de aproximadamente 1 500 fontes radioativas entre 1996 e 2008, com mais da metade nunca recuperada. Um estudo feito pela União Europeia estimou que mais de 70 fontes são perdidas anualmente do controle regulatório dentro de suas fronteiras. Apesar de a maioria dessas fontes não representar um risco radiológico significativo, os acidentes são a maior preocupação em relação às fontes órfãs.

Estimativas mundiais de acidentes graves com radiação*

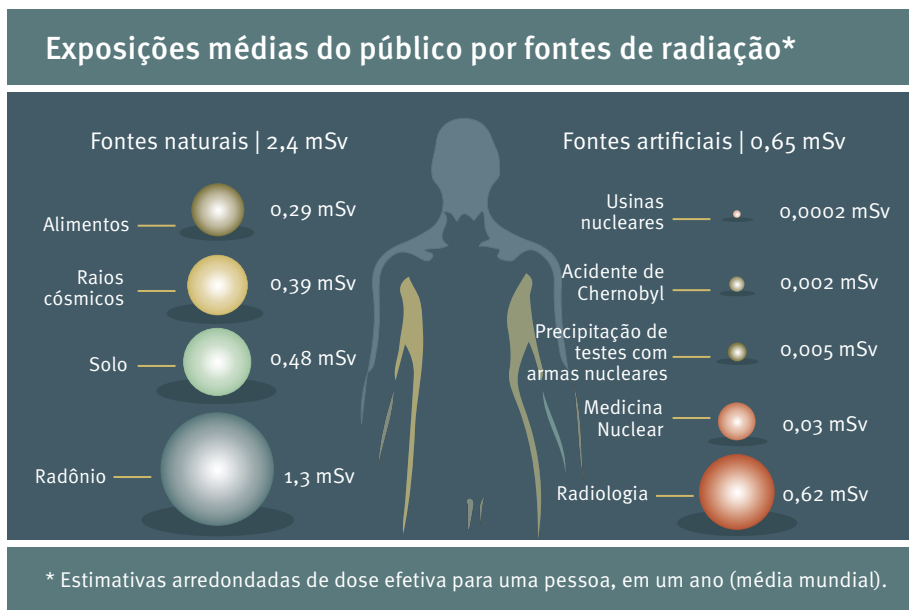
Tipo de acidente	1945–1965	1966–1986	1987–2007
Acidentes em instalações nucleares	19	12	4
Acidentes em indústrias	2	50	28
Acidentes com fontes órfãs	3	15	16
Acidentes em universidades/ pesquisa	2	16	4
Acidentes em medicina	—	18	14

* Baseados em acidentes que tenham sido oficialmente notificados ou publicados. É possível que o número de acidentes não relatados, especialmente em medicina, seja muito maior.

Fontes seladas e seus contêineres podem ser atrativos para pessoas que recolhem sucatas de metal porque aparentam ser feitas de metal valioso e podem não exibir um rótulo de advertência sobre radiação. Casos nos quais trabalhadores inocentes, ou mesmo membros do público, tenham mexido em fontes radioativas resultaram em lesões graves e, em alguns casos, a morte, como foi o caso de Goiânia, no Brasil, em 1987. Um equipamento abandonado de teleterapia com uma fonte altamente radioativa (50,9 TBq) de Césio-137 foi roubado, e a fonte selada foi aberta. Durante as duas semanas seguintes, o pó de cloreto de césio solúvel foi espalhado em um ferro-velho e em casas vizinhas. Inúmeras pessoas desenvolveram doenças e lesões na pele, e 110 000 pessoas tiveram que ser monitoradas para avaliação de contaminação radioativa; muitas foram internamente contaminadas com Césio-137. Devido a esse acidente, quatro pessoas morreram, incluindo uma criança.

3.3. Exposição média à radiação de trabalhadores e do público

Geralmente, as pessoas expostas à radiação proveniente de fontes naturais têm maior influência sobre a exposição total. O UNSCEAR estimou que a dose efetiva anual média para um indivíduo seja de cerca de 3 mSv. Em média, a dose anual proveniente de fontes naturais é 2,4 mSv e dois terços desse valor provêm de substâncias radioativas no ar que respiramos, nos alimentos que comemos e na água que bebemos. A origem principal de exposição proveniente de fontes artificiais é a radiação utilizada na medicina, com dose efetiva anual média por indivíduo de 0,62 mSv. A exposição devido à radiologia varia por região, por país e mesmo pelo sistema de saúde disponível. O UNSCEAR tem estimado que a dose efetiva anual média proveniente de aplicações médicas da radiação em países industrializados é de 1,9 mSv, e em países não industrializados de 0,32 mSv. Contudo, esses valores podem variar consideravelmente (p.ex. nos Estados Unidos é 3 mSv e no Quênia apenas 0,05 mSv).



Até a década de 1990, a atenção no que concerne à exposição de trabalhadores apenas levava em conta as fontes artificiais de radiação. Atualmente, no entanto, já é sabido que um grande número de profissionais é exposto a fontes naturais de radiação, principalmente na indústria de mineração. Para certas ocupações no setor da mineração, a inalação de gás Radônio domina sobre os todos os tipos de exposição ocupacional. Embora a liberação de Radônio das minas subterrâneas

de Urânio contribua substancialmente para a exposição ocupacional na indústria nuclear, a dose efetiva anual média para um trabalhador na indústria nuclear, em geral, tem diminuído de 4,4 mSv nos anos 1970, para cerca de 1 mSv, atualmente. No entanto, a dose efetiva anual média para um trabalhador das minas de carvão é ainda em torno de 2,4 mSv, e para outros tipos de mineiros, cerca de 3 mSv.

A estimativa atual do número de trabalhadores monitorados é de cerca de 23 milhões em todo o mundo, dos quais 10 milhões são expostos a fontes artificiais. Três em cada quatro trabalhadores expostos a fontes artificiais em seu trabalho são do setor médico, com uma dose efetiva anual de 0,5 mSv por trabalhador. A avaliação das tendências de dose efetiva anual média por trabalhador mostra um aumento na exposição por fontes naturais, principalmente devido à mineração, e uma diminuição na exposição por fontes artificiais, principalmente pela implantação eficiente de medidas de proteção à radiação.

Índice mundial de exposição radiológica de trabalhadores (mSv)*				
Décadas	1970	1980	1990	2000
Fontes naturais				
Tripulação aérea	—	3,0	3,0	3,0
Mineração de carvão	—	0,9	0,7	2,4
Outras minerações **	—	1,0	2,7	3,0
Fontes diversas	—	6,0	4,8	4,8
Total	—	1,7	1,8	2,9
Fontes artificiais				
Uso Médico	0,8	0,6	0,3	0,5
Indústria nuclear	4,4	3,7	1,8	1,0
Outras indústrias	1,6	1,4	0,5	0,3
Fontes diversas	1,1	0,6	0,2	0,1
Total	1,7	1,4	0,6	0,5

* Estimativas de dose efetiva média por trabalhador, em um ano.
 ** Mineração de Urânio está incluída na indústria nuclear.

PUBLICAÇÕES DO UNSCEAR

Desde sua criação, o Comitê Científico das Nações Unidas para os Efeitos da Radiação Atômica (UNSCEAR) tem publicado 25 relatórios com cerca de 100 anexos científicos, que são altamente recomendados como principais fontes de avaliação das exposições à radiação provenientes de testes de armas nucleares e produção de energia nuclear, usos médicos da radiação, fontes de exposição ocupacional e fontes naturais. Esses relatórios também avaliam estudos detalhados sobre câncer radioinduzido e doenças hereditárias, e as consequências radiológicas de acidentes na saúde e no meio ambiente. Os relatórios do UNSCEAR e seus anexos científicos são disponibilizados como publicações vendidas pelas Nações Unidas (unp.un.org) e por download gratuito (unscear.org) de forma a disseminar os achados para o benefício dos Estados Membros das Nações Unidas, a comunidade científica e o público.

O envio de comentários e retorno sobre essa publicação são altamente apreciados para:

UNSCEAR secretariat
Vienna International Centre
P.O. Box 500
1400 Vienna, Austria
E-mail: unscear@unscear.org

Em 1955, a Assembleia Geral das Nações Unidas estabeleceu o Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation - UNSCEAR) para coletar e avaliar informações dos níveis e efeitos da radiação ionizante.

Isso foi em resposta à preocupação sobre os efeitos da radiação ionizante na saúde humana e no meio ambiente, tais como naquele tempo o fallout de testes com armas nucleares na atmosfera atingindo as pessoas através do ar, da água e dos alimentos. O primeiro relatório do UNSCEAR estabeleceu os fundamentos científicos sobre os quais, em 1963, o Tratado de Banimento Parcial de Testes proibindo testes atmosféricos com armas nucleares foi negociado.

Essa publicação tenta apresentar objetivamente os conhecimentos mais recentes sobre os níveis de radiação e efeitos de forma acessível para o leitor em geral. Essa é baseada em relatórios científicos do UNSCEAR que são usados como principal fonte de informação.



UNEP