



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE FORMAÇÃO DOCENTE
CURSO DE FÍSICA - LICENCIATURA

MILENA RITA DOS SANTOS DE ARAÚJO

RADIAÇÃO IONIZANTE E POSSÍVEIS INFLUÊNCIAS NAS ALTERAÇÕES
CAUSADAS NO DNA: análise bibliográfica de periódicos com classificação
Qualis A1 e revistas acadêmicas de Universidades Federais do Nordeste

CARUARU
2025

MILENA RITA DOS SANTOS DE ARAÚJO

**RADIAÇÃO IONIZANTE E POSSÍVEIS INFLUÊNCIAS NAS ALTERAÇÕES
CAUSADAS NO DNA: análise bibliográfica de periódicos com classificação
Qualis A1 e revistas acadêmicas de Universidades Federais do Nordeste**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Física-
Licenciatura do Centro Acadêmico do
Agreste da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial
para obtenção do título de Licenciada
em Física.

Área de Concentração: Física Médica

Orientador: Gustavo Camelo Neto

CARUARU

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Araújo, Milena Rita dos Santos de .

Radiação ionizante e possíveis influências nas alterações causadas no DNA: análise bibliográfica de periódicos com classificação Qualis A1 e revistas acadêmicas de Universidades Federais do Nordeste / Milena Rita dos Santos de Araújo. - Caruaru, 2025.

78 : il.

Orientador(a): Gustavo Camelo Neto

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, Física - Licenciatura, 2025.

Inclui referências.

1. Radiação ionizante. 2. Mutação. 3. Danos ao DNA. I. Camelo Neto, Gustavo . (Orientação). II. Título.

530 CDD (22.ed.)

MILENA RITA DOS SANTOS DE ARAÚJO

**RADIAÇÃO IONIZANTE E POSSÍVEIS INFLUÊNCIAS NAS ALTERAÇÕES
CAUSADAS NO DNA: análise bibliográfica de periódicos com classificação
Qualis A1 e revistas acadêmicas de Universidades Federais do Nordeste**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Licenciatura em
Física do Campus Agreste da Universidade
Federal de Pernambuco - UFPE, na modalidade
MONOGRAFIA como requisito parcial para
obtenção do título de LICENCIADA EM FÍSICA.

Aprovada em: 15/04/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gustavo Camelo Neto (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Augusto César Lima Moreira (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Bianca Santana dos Santos (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Pernambuco

Foi pensando na ciência interdisciplinar que executei este trabalho, por isso o dedico a todos aqueles a quem esta pesquisa possa auxiliar.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por permitir que eu tivesse determinação e constância para finalizar a pesquisa.

Aos amigos de graduação, por todo o apoio e pela ajuda, que muito contribuíram para a realização deste trabalho.

A minha família, por todo apoio e incentivo, principalmente a minha mãe, Jucilene Rita, por sempre acreditar na educação e me apoiar de forma financeira e emocional durante toda a minha jornada nas ciências.

Ao professor Gustavo Camelo Neto, por ter sido meu orientador e ter desempenhado tal função com dedicação.

Aos professores de graduação em Licenciatura em Física e em Bacharelado em Biomedicina, pelas correções e ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho na construção de pesquisas e auxiliaram diretamente no meu processo de formação profissional.

À Universidade Federal de Pernambuco, essencial no meu desenvolvimento profissional, pelo material ofertado e por tudo o que aprendi ao longo dos anos do curso.

RESUMO

A radiação ionizante é aquela que tem energia capaz de remover elétrons dos átomos quando interage com a matéria, formando íons ou partículas ionizadas. Quando um indivíduo é exposto a radiações ionizantes, existe a possibilidade de ocasionar irregularidades para o organismo, danos reversíveis ou não, dependendo do tempo de exposição e da quantidade de radiação absorvida. Este estudo teve como objetivo revisar a literatura disponível referente a radiação ionizante e possíveis consequências genéticas, publicadas no período de 2000 a 2024, a fim de investigar como a temática vem sendo desenvolvida pela comunidade científica. Para isso foi realizado um levantamento bibliográfico em revistas de alto impacto classificadas como QUALIS A1 pela plataforma Sucupira e revistas acadêmicas de Universidades Federais, mediante critérios de inclusão e exclusão, utilizando as palavras chaves “radiação ionizante”, “DNA/genoma/material genético” e “mutação genética”. Para a busca por artigos foram feitas 3 pesquisas complementares, as quais estavam relacionadas com palavras chave específicas às suas áreas de conhecimento, foram estas: física/ciências, ciências biológicas/biologia/saúde e interdisciplinar/ciências/saúde. Os artigos revisados foram considerados quanto ao tipo de publicação, ano de publicação e área de estudo. Constatou-se uma reduzida quantidade de publicações relacionadas às alterações no DNA causadas pela radiação ionizante, o que impossibilitou uma análise mais minuciosa sobre como a radiação pode afetar as moléculas celulares e causar desequilíbrio nas organelas e no material genético. Ao todo, foram analisados 17 artigos, destes, 11 foram desenvolvidos em Universidades Federais do nordeste brasileiros, região com mais pesquisas na área de interesse. Por fim, analisou-se que a radiação ionizante pode ocasionar alterações bioquímicas, rompimento da dupla fita, morte celular ou mutações genéticas que podem levar a efeitos celulares ou estocásticos.

Palavras-chave: radiação ionizante; danos ao DNA; mutação.

ABSTRACT

Ionizing radiation is radiation that has energy capable of removing electrons from atoms when it interacts with matter, forming ions or ionized particles. When an individual is exposed to ionizing radiation, there is the possibility of causing irregularities to the organism, reversible or irreversible damage, depending on the time of exposure and the amount of radiation absorbed. This study aimed to review the available literature on ionizing radiation and possible genetic consequences, published between 2000 and 2024, in order to investigate how the subject has been developed by the scientific community. For this purpose, a bibliographic survey was carried out in high-impact journals classified as QUALIS A1 by the Sucupira platform and academic journals from Federal Universities, using inclusion and exclusion criteria, using the keywords “ionizing radiation”, “DNA/genome/genetic material” and “genetic mutation”. Three complementary searches were conducted to search for articles, which were related to keywords specific to their areas of knowledge: physics/sciences, biological sciences/biology/health and interdisciplinary/sciences/health. The reviewed articles were considered according to the type of publication, year of publication and area of study. A small number of publications related to DNA changes caused by ionizing radiation were found, which made it impossible to conduct a more detailed analysis of how radiation can affect cellular molecules and cause imbalance in organelles and genetic material. In total, 17 articles were analyzed, of which 11 were developed in Federal Universities in the Brazilian Northeast, a region with the most research in the area of interest. Finally, it was analyzed that ionizing radiation can cause biochemical changes, double-strand breakage, cell death or genetic mutations that can lead to cellular or stochastic effects.

Keywords: ionizing radiation; DNA damage; mutation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Algumas propriedades de nucleotídeos selecionados	19
Figura 2 -	Esquema ilustrativo: diferença entre o curie, o roentgen, o rad e o rem	24
Figura 3 -	Representação esquemática do espectro eletromagnético	25
Figura 4 -	Fontes de exposição à radiação ionizante, conforme suas contribuições para uma dose anual e suas respectivas proporções	27
Figura 5 -	Capacidade de penetração das diferentes radiações	29
Figura 6 -	Distribuição espacial média de eventos ionizantes para diferentes valores de LET em relação à estrutura de dupla hélice do DNA	32
Figura 7 -	Estrutura dupla hélice do DNA desenvolvido por James Dewey Watson e Francis Harry Compton Crick	37
Figura 8 -	Efeitos celulares da radiação ionizante	38
Figura 9 -	Mecanismos de ação da radiação em organismos vivos	40
Figura 10 -	Ilustração esquemática da distribuição espacial de DSBs (Double-Strand Break)	42
Figura 11-	Crítérios de seleção de pesquisas	51
Figura 12 -	Fluxograma dos artigos selecionados	57

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 -	Descrição das unidades de radiação	23
Quadro 2 -	Os diversos tipos de interações e de consequências de acordo com o tipo de radiação ionizante, Raios X e γ	33
Quadro 3 -	Principais grandezas da dosimetria utilizada na radioproteção	43
Quadro 4 -	Estratégia de busca	48
Quadro 5 -	Periódicos selecionados na área de Ciências Biológicas e Interdisciplinar	52
Quadro 6 -	Periódicos selecionados na área de Física e Ciências	55
Quadro 7 -	Pesquisas selecionadas de Universidades Federais do Nordeste	55
Quadro 8 -	Periódicos em Ciências Biológicas e interdisciplinares	57
Quadro 9 -	Periódicos em Física e Ciências	60
Quadro 10 -	Periódicos selecionados de Universidades Federais do Nordeste	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Número de massa atômica
BER	Base Excision Repair – Reparo por Excisão de Base
Ci	Curie
DNA	Ácido desoxirribonucleico
DSB	Double-strand Break – Quebras de Fita Dupla DNA
Gy	Gray - Unidade de Dose Absorvida
H	Hidrogênio
LET	Linear Energy Transfer – Transferência Linear de Energia
N	Número de nêutrons
R	Roentgen
Rad	Dose de Radiação absorvida
RBE	Relative Biological Effectiveness – Efetividade Biológica Relativa
REM	Dose equivalente de radiação
RI	Radiação ionizante
RNA	Ácido Ribonucleico
SBS	Single-strand Break – Quebras de Fita Simples

SI	Sistema Internacional de Unidades
SSA	Single-strand Annealing – Anelamento de Fita Simples
Sv	Sievert - Unidade de Dose Equivalente
U	Massa atômica
Z	Número de prótons no núcleo/ número atômico
α	Raios alfa
β	Raios beta
γ	Raios gama

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	OBJETIVO GERAL	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3	HIPÓTESE DE PESQUISA	17
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
4.1	INTRODUÇÃO À FÍSICA NUCLEAR	18
4.2	RADIAÇÃO	25
4.2.1	Radiação ionizante	27
4.2.2	Radiação ionizante: comportamento atômico	30
4.2.3	Transferência Linear de Energia (LET)	31
4.2.4	Interação da radiação ionizante com a matéria	33
4.3	RADIAÇÃO IONIZANTE E O DNA HUMANO	35
4.4	RADIOPROTEÇÃO	43
5	METODOLOGIA	47
5.1	ESTRATÉGIA DE BUSCA	47

5.2	CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO	49
6	RESULTADOS	52
6.1	ARTIGOS SELECIONADOS	52
6.2	FLUXOGRAMA DOS ARTIGOS SELECIONADOS	56
6.3	ANÁLISE DAS PRINCIPAIS INFORMAÇÕES INCLUÍDAS NA PESQUISA	57
7	DISCUSSÃO	69
8	CONCLUSÃO	73
	REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

O termo radiação ionizante refere-se ao transporte de energia realizada na forma de ondas eletromagnéticas ou de partículas subatômicas que têm a capacidade de executar a ionização da matéria, gerando energia, ou seja, são aquelas radiações que, ao atravessar a matéria, interagem com os átomos mediante alterações físicas e químicas, ionizando-os. Essa ionização da matéria pode afetar as moléculas do organismo quando estas passam pelo processo que transformam os átomos e as partículas eletricamente estáveis em eletricamente instáveis, causando prejuízos ao processo de homeostase, isto é, o equilíbrio interno do organismo (Flor; Kirchhoff, 2006).

Como consequência da interação da radiação com a matéria ocorre transferência de energia, o que pode provocar ionização e excitação de átomos e moléculas associadas, ocasionando alterações que podem ser temporárias ou permanentes nas células, resultando em danos biológicos. Quando um indivíduo é exposto a radiações ionizantes, existe a possibilidade de desenvolver sequelas para o organismo, incluindo em células somáticas, responsáveis por formar tecidos e órgãos, e germinativas, responsáveis pela formação de células reprodutivas. Tais consequências podem causar lesões teciduais e, em casos mais avançados, anomalias genéticas. Os danos no material genético, chamados de mutações, são prejuízos que ocorrem nas moléculas de DNA, parte integrante do núcleo celular de seres eucariotos e de grande importância para manutenção da vida; estes danos podem ocorrer mediante a elevada exposição à radiação, acometendo o indivíduo e favorecendo o desenvolvimento de alterações como síndromes, erros de duplicação do DNA e até câncer (Veludo, 2011).

Os efeitos biológicos da radiação são respostas imunológicas do organismo a um agente agressor, em relação à radiação é o resultado da interação da energia radiativa com a matéria e pode ser reversível ou não, dependendo basicamente do tempo de exposição, do nível de dano e da dose absorvida. A preocupação a respeito dos possíveis efeitos adversos provenientes das radiações nos últimos anos tem sido crescente devido à elevada exposição à radiação nos ambientes de trabalho, sejam voltados à indústria, pesquisa ou área hospitalar. Desta forma, há o consenso por parte da comunidade científica de que altas doses de radiação têm potencial capacidade de produzir problemas genéticos ao organismo, assim, as pesquisas

científicas na área buscam produzir e desenvolver materiais de informação sobre a radiação ionizante e seus possíveis efeitos na matéria, incluindo as lesões causadas ao corpo humano (Ardenghi *et al.*, 2003).

Diante da relevância deste tema, é evidente a importância de buscar embasamento teórico sobre radiação ionizante, sua interação com a matéria e como a exposição a elevadas doses pode ser capaz de danificar o genoma humano. Nesse sentido, o levantamento bibliográfico sobre danos no DNA causados por radiação permite trabalhar de forma ampla os conceitos físicos e biológicos envolvidos no processo de ionização, contribuindo efetivamente para que a comunidade acadêmica mantenha ativa a pesquisa nessa área. Desta forma, o presente estudo teve o objetivo de investigar a literatura disponível em diferentes periódicos classificados como QUALIS A1 e revistas acadêmicas de Universidades Federais do nordeste brasileiro, a fim de avaliar como estão as pesquisas sobre radiação ionizante no século 21, considerando o alto impacto dessas informações no âmbito científico na área de física e saúde. A escolha por incluir apenas as universidades federais nordestinas justifica-se pela grande quantidade de periódicos publicados na região, estando a frente das outras regiões do país (norte, sul, sudeste e centro-oeste) e apresentando resultados valiosos na temática.

Torna-se necessário explicar que a classificação Qualis, vigente do ano 2000 a 2024, foi substituída por uma nova metodologia de análise de artigos publicada pela Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ou seja, os artigos publicados a partir de 2025 seguem um novo padrão de avaliação. Desta maneira, os artigos selecionados para reflexão não contemplam a nova metodologia avaliativa, mas respeitam o já consagrado Qualis A1, melhor conceito obtido pelas revistas científicas até o ano de 2024.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Realizar um levantamento bibliográfico sobre como ocorre o processo de ionização da molécula de DNA e como este processo afeta o equilíbrio biológico do organismo humano.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Posteriormente a delimitação do objetivo geral, quatro objetivos específicos foram construídos após a leitura dos resumos das pesquisas selecionadas para revisão. Os objetivos específicos foram definidos de acordo com a área de pesquisa, sendo um objetivo específico em Física (1), um objetivo específico em Ciências Biológicas (2), um objetivo específico de forma conjunta em Física e Ciências Biológicas (3) e, por fim, um objetivo específico buscando enfatizar a educação e acesso à informação em processos de exposição à radiação ionizante (4). A seguir estão delimitados os objetivos específicos de pesquisa de acordo com a sua área.

- 1- Analisar o que a literatura científica relata sobre a radiação ionizante e o seu comportamento com a matéria.
- 2- Avaliar quais os danos no DNA causados pela radiação ionizante e suas consequências ao organismo humano.
- 3- Investigar quais são os limites da dose radioativa que o organismo humano pode suportar sem causar sequelas ao DNA.
- 4- Avaliar o que os estudos reportam sobre a importância da educação em radioproteção como forma de minimizar a exposição excessiva à radiação ionizante.

3 HIPÓTESE DE PESQUISA

Espera-se uma fragmentação excessiva de pesquisas interdisciplinares sobre radiação ionizante e suas possíveis influências no DNA humano nos últimos 25 anos.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Na área da ciência física, a radiação é compreendida como a propagação de energia de um ponto a outro de um sistema, seja no vácuo ou em qualquer meio material, podendo ser classificada como energia transitória, ocorrendo por meio de uma onda ou partícula. Para assimilar os conhecimentos entre os aspectos físicos e consequências biológicas referentes à radiação ionizante, é necessário aprofundar os conceitos.

4.1 INTRODUÇÃO À FÍSICA NUCLEAR

Tudo o que nos cerca é constituído por matéria, os elementos que a constituem são formados por átomos de elementos químicos. De maneira geral, é tudo aquilo que detém massa e volume e é dividido em duas regiões: o núcleo, com característica positiva, e a eletrosfera, com característica negativa. O núcleo é constituído por nêutrons (partículas de carga neutra) e prótons (partículas de carga positiva), enquanto a eletrosfera é composta por elétrons (partículas de carga negativa) (Walker, H.R., 1993).

Os núcleos são constituídos por prótons e nêutrons; o número de prótons presentes no núcleo (número atômico) é simbolizado por Z ; de outro modo, o número de nêutrons é simbolizado por N . O número total de nêutrons e prótons no núcleo atômico é chamado de número de massa (A). Desta forma, temos a Equação 1:

$$A = Z + N . \quad (1)$$

Os nêutrons e prótons, unidamente, são chamados de nuclídeos e são representados por símbolos (Figura 1). Os nuclídeos com o mesmo número atômico (Z), mas com o número de nêutrons (N) diferentes são descritos como isótopos. Por exemplo, o ouro tem 36 isótopos, mas somente um é estável, assim, os outros 29 isótopos são radioativos. Estes isótopos radioativos são denominados radionuclídeos, que são reduzidos pela emissão espontânea de uma partícula com vida média. Assim, tem-se que Radionuclídeo ou Radioisótopo são nuclídeos emissores de partículas e/ou radiação, ou seja, núcleo instável.

Nuclídeo	<i>Z</i>	<i>N</i>	<i>A</i>	Abundância/Meia-vida ^a	Massa ^b (u)	Spin ^c	Energia de Ligação (MeV/núcleon)
¹ H	1	0	1	99,985%	1,007 825	$\frac{1}{2}$	—
⁷ Li	3	4	7	92,5%	7,016 004	$\frac{3}{2}$	5,60
³¹ P	15	16	31	100%	30,973 762	$\frac{1}{2}$	8,48
⁸⁴ Kr	36	48	84	57,0%	83,911 507	0	8,72
¹²⁰ Sn	50	70	120	32,4%	119,902 197	0	8,51
¹⁵⁷ Gd	64	93	157	15,7%	156,923 957	$\frac{3}{2}$	8,21
¹⁹⁷ Au	79	118	197	100%	196,966 552	$\frac{3}{2}$	7,91
²²⁷ Ac	89	138	227	21,8 anos	227,027 747	$\frac{3}{2}$	7,65
²³⁹ Pu	94	145	239	24.100 anos	239,052 157	$\frac{1}{2}$	7,56

Figura 1. Algumas propriedades de nucleotídeos selecionados (Fonte: Walker, H.R., 1993).

Ao analisar a Figura 1, tem-se que *Z* é o número de prótons do elemento, *N* é o número de nêutrons, *A* é o número de massa (valor aproximado), Estabilidade é a abundância do elemento, Massa (u) é a massa atômica do elemento químico (valor exato), Raio (fm) é o raio atômico de um elemento químico (corresponde a distância média entre o núcleo do átomo e a camada eletrônica mais externa) e, por fim, a Energia de ligação(MeV/núcleon) é a energia necessária para dividir o núcleo do átomo em prótons e nêutrons (Tipler, 2000).

Compreende-se melhor o valor da estabilidade a partir do princípio de que a variedade de substâncias que compõem o planeta Terra fundamentam-se na combinação dos elementos químicos, os quais comportam-se na natureza em quantidades distintas. Esta grandeza é relativa, sendo obtida pela observação. Assim, os elementos químicos apresentam-se com isótopos estáveis e outros radioativos; os estáveis são mais abundantes porque não decaem, enquanto que os radiativos vão se desintegrando e transformando-se em outros mais estáveis (Feynman, R.P., 2008).

Neste sentido, utiliza-se o exemplo do hidrogênio, este possui dois isótopos estáveis: o prótio (com apenas um próton no núcleo) e o deutério (com um próton e um nêutron no núcleo), sendo que o prótio é o mais abundante, mantendo a estabilidade de 99,985%, de acordo com a Figura 1. Assim, é possível notar que os valores de estabilidade dos elementos correspondem respectivamente a seu percentual de abundância (Feynman, R.P., 2008).

Em alguns casos, a estabilidade de um elemento químico é medida em anos, visto que sua medida é baseada em meias-vidas. Isso ocorre porque núcleos radioativos são instáveis e decaem espontaneamente emitindo uma radiação que os transformam em outros núcleos mais estáveis. Núcleos estáveis têm meias-vidas muito longas (mais de bilhões de anos). A estabilidade de um nuclídeo de actínio (Ac) - assim como a estabilidade de outros isótopos radioativos - é medida em anos, pois a meia-vida (anos) de um isótopo radioativo é o tempo fundamental para que metade dos núcleos de um elemento sofra fragmentação.

Deste modo, de acordo com os fundamentos físicos, temos que os nêutrons não são estáveis fora do núcleo e que, dada essa característica, eles decaem, transformando-se em outras partículas. Desta forma, o nêutron é considerado um estado excitado do próton. A radioatividade é um fenômeno de decaimento nuclear (decaimento radioativo) que, por sua vez, depende da estabilidade do núcleo, ou seja, um núcleo pode mudar sua configuração interna por meio de três categorias de processos de emissão: partículas alfa (núcleos de hélio), partículas beta (elétrons) e raios gama (fótons). Esses três tipos de decaimento levam o núcleo a uma configuração energeticamente mais estável. O decaimento radioativo proporcionou a primeira evidência de que as leis que governam os sistemas atômicos são baseadas em valores numéricos e estatísticos. Desse modo, é possível calcular a natureza do decaimento com base nos seus valores, como Z, N e A, considerando o tempo de decaimento. Se considerarmos que uma amostra contendo N núcleos radioativos, a taxa de decaimento ($-dN/dt$) será proporcional a N (Equação 2) (Walker, H.R., 1993):

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N, \quad (2)$$

onde, λ é a constante de desintegração e detém o valor característico para cada radionuclídeo. Resolvendo a equação diferencial (Equação 2), obtemos:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} , \quad (3)$$

onde N_0 corresponde ao número de núcleos radioativos na amostra, no instante $t=0$. N corresponde ao número remanescente de qualquer instante posterior a t .

Todavia, o decaimento dos radionuclídeos segue uma lei complementar distinta. O decaimento radioativo é expresso por meio da Equação 4:

$$R = \frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} . \quad (4)$$

ou

A taxa de decaimento R também é conhecida como atividade do radionuclídeo. A unidade R é a representação de desintegrações por segundo (contagem por segundo).

A meia-vida (Equação 5) é determinada como o tempo médio necessário para que a taxa de decaimento R , ou o número N , sintetize-se a metade do seu valor inicial (para que R seja metade de R_0), ou seja, τ é a relação entre a meia-vida e a constante de desintegração. O valor de τ é descrito como:

$$\tau = \frac{(\ln 2)}{\lambda} . \quad (5)$$

Mediante estes conceitos físicos, o estudo dos tipos de decaimento será compreensível. Como citado anteriormente, os átomos instáveis em nível nuclear e na busca de estabilidade que emitem partículas ou ondas eletromagnéticas são radioativos, assim, as reações que ocorrem no núcleo de elementos radioativos são reações de decaimento. Quando ocorrem naturalmente, as radiações emitidas são conhecidas como alfa, beta e gama (Walker, H.R., 1993).

No decaimento alfa, um núcleo pesado torna-se mais estável por meio da emissão espontânea de partículas α , assim, ocorre a emissão de uma partícula que tem estrutura formada por dois prótons e dois nêutrons. Esse decaimento é limitado

por uma barreira potencial, a qual tem a penetrabilidade e a meia-vida do decaimento alfa muito sensíveis à energia da partícula (Tipler, 2000).

O decaimento beta consiste na emissão de um elétron, ou de um pósitron, simultaneamente com um neutrino pelo núcleo. Esse elétron é originário do decaimento de um nêutron em um próton mais um elétron, sendo que o próton continua no interior do núcleo. Nesse processo há uma mudança da carga do núcleo (número atômico), mas não da massa, que continua praticamente inalterada (Tipler, 2000).

Por sua vez, no decaimento gama, o núcleo atômico atua em condições correspondentes a estados de energias bem definidas, da mesma forma que os estados eletrônicos num átomo. Ao sofrer um rearranjo interno, ou passar de um estado excitado (mais energético) para um de energia mais baixa, o núcleo emite fótons (partículas elementares que compõem a luz), onde a energia é equivalente à diferença entre os níveis envolvidos. Tipicamente, os fótons emitidos têm energia muito alta, que pode atingir vários MeV (mega-elétron-volt), ou seja, a unidade de energia de uma partícula física ou atômica, 1 MeV corresponde a 1 milhão de elétrons-volt. A energia capaz de atingir diversos MeV é denominada raios gama. Os raios gama são conhecidos por sua influência prejudicial aos organismos vivos, sendo capaz de passar pela maioria dos materiais de proteção comuns e danificar o DNA nos tecidos vivos, rompendo ligações químicas e causando sérios problemas à replicação do código genético (Braga, 2006).

Ao trabalharmos radiação e decaimento radioativo, é necessário compreender medidas de dose de radiação. A radiação é subdividida em duas classes, radiação ionizante e não ionizante. A radiação ionizante tem capacidade de remover elétrons de átomos e criar íons, afetando seriamente as moléculas orgânicas e suas funções primordiais; sendo encontrada na natureza nos raios cósmicos e em elementos radioativos da crosta terrestre. O efeito da radiação ionizante, incluindo os raios gama, elétrons e partículas alfa (α) sobre as células vivas, incluindo as células humanas, tornou-se uma questão de interesse público. Desta forma, é preciso descrever e analisar as unidades nas quais as propriedades e os efeitos dessa classe de radiação são expressas. São quatro unidades, Curie (Ci), Roentgen (R), Rad e Rem, as quais serão descritas no Quadro 1 (Walker, H.R., 1993).

Unidade de radiação	Descrição
Curie (Ci)	<p>É a medida de atividade de uma fonte radioativa. O Ci é definido como</p> <p>1 Ci = $3,7 \times 10^{10}$ desintegrações por segundo.</p> <p>- Esta definição nada diz sobre a natureza dos decaimentos radioativos.</p>
Roentgen (R)	<p>É uma medida de exposição, ou seja, da capacidade de um feixe de raios X ou raios gama, ou de outra radiação ceder energia ao material por meio do qual ele passa.</p> <p>- Um R é definido como a capacidade de ceder 8,87 mJ (milijoule) de energia a 1 kg de ar seco em condições normais.</p>
Rad (dose de radiação absorvida)	<p>É a abreviatura de dose de radiação absorvida (do ingles radiation absorbed dose), sendo uma medida da dose (energia) realmente absorvida por um objeto específico.</p> <p>- Consideramos que um objeto recebe uma dose absorvida de 1 rad quando a energia cedida a ele por unidade de massa, pela radiação ionizante, é de 10 mJ/Kg (milijoule por quilograma).</p>
Rem (dose equivalente)	<p>A dose equivalente (rems) encontra-se pela multiplicação da dose absorvida (rads) por um fator de efetividade biológica relativa (RBE).</p> <p>- Leva em conta o fato de que , embora diferentes tipos de radiação possam ceder a mesma quantidade de energia por unidade de massa ao corpo, os efeitos biológicos não são os</p>

	mesmos.
--	---------

Quadro 1. Descrição das unidades de radiação (Fonte: Walker, H.R., 1993).

Ao observar o Quadro 1 é possível correlacionar os conceitos de eV (elétron-volt), R (Roentgen) e Rad (dose de radiação absorvida), considerando como unidade o Joule. Temos que, $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Joules}$, essa medida é comumente utilizada para calcular a energia cinética de corpos com massas muito pequenas, como problemas envolvendo átomos e radiação. De outro modo, temos que $1 \text{ Roentgen} = 8,87 \times 10^{-4} \text{ J/Kg}$ (joules por quilograma) e $1 \text{ Rad} = 10 \times 10^{-4} \text{ J/Kg}$, ambos os resultados são convertidos para Joules para medir energia, trabalho ou fluxo de calor em um sistema. No estudo de radiação, o Joule representa a quantidade de energia de radiação ionizante absorvida por unidade de massa, entretanto, é uma quantidade física, portanto, não leva em consideração condições biológicas do organismo, como enfermidades pré-existent. Posteriormente, será detalhado a relação entre J/Kg (Joules por quilo) e Gray (Gy), onde ambas são unidades de medida que representam quantidade semelhante de energia de radiação ionizante absorvida, considerando a massa no corpo atingido. Com base nesses conceitos, a Figura 2 representa a diferença de R, Rad, Gray e Ci.

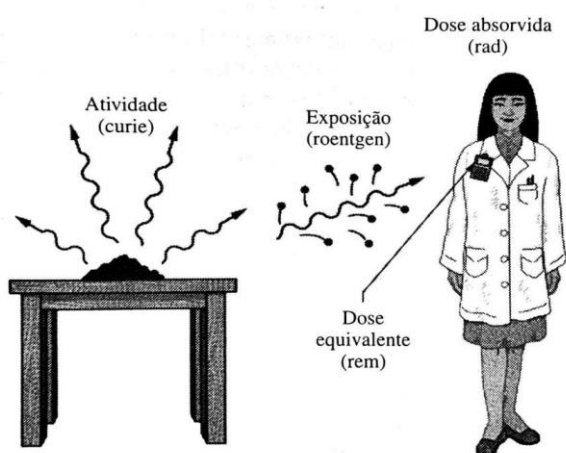


Figura 2. Esquema ilustrativo: diferença entre o curie, o roentgen, o rad e o rem (Fonte: Walker, H.R., 1993).

A partir dos critérios abordados sobre física nuclear, é possível iniciar o estudo sobre radiação ionizante, sua interação com a matéria e influências na estrutura do DNA humano.

4.2 RADIAÇÃO

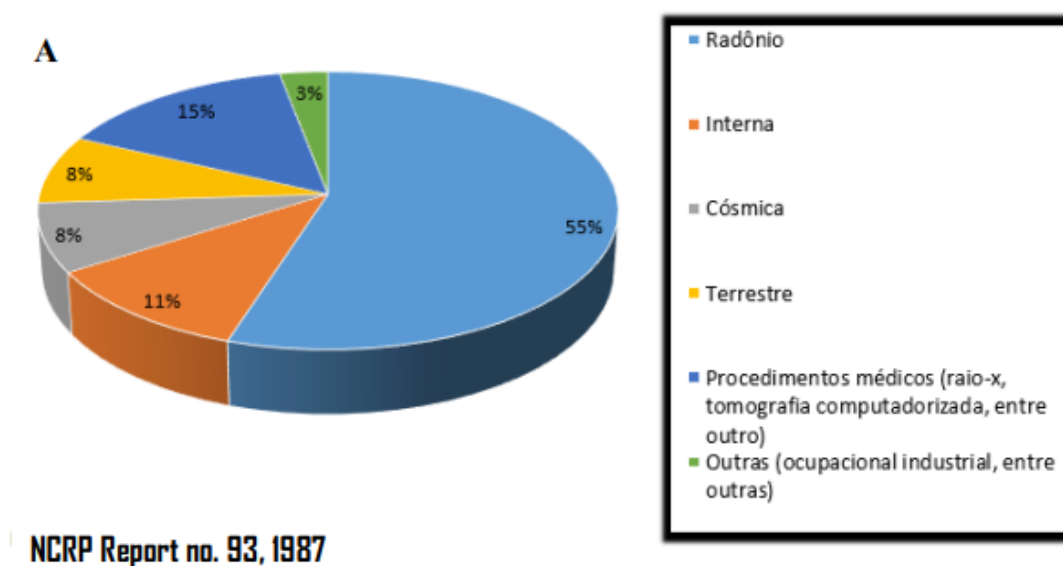
A radiação é a energia propagada na conformação de ondas eletromagnéticas ou partículas. Existem duas classes de radiação, não-ionizante e ionizante, a primeira representa ondas de maior comprimento e menor frequência, por exemplo, a luz visível, o micro-ondas, sinais de transmissão para televisão e o rádio; por outro lado, a radiação ionizante exibe alta frequência e menor comprimento de onda, como a ultravioleta, raios-x, raios gama e raios cósmicos. Os exemplos de radiação não-ionizante e ionizante podem ser observados na Figura 3. Ao observar a ilustração, é possível compreender que quanto maior a frequência da onda, maior é a energia transmitida, o que fornece à radiação ionizante a capacidade de ionizar, ou seja, de retirar elétrons da camada de valência de átomos-alvos quando interage com a matéria, transformados em íons. A retirada de elétrons é capaz de alterar as interações químicas entre os átomos das moléculas, causando instabilidade e prejuízos a suas funções essenciais (WNA, 2016).



Figura 3. Representação esquemática do espectro eletromagnético. Fonte: adaptada do Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Física e Ufrgs).

De acordo com a Figura 3, é possível perceber que os seres humanos estão constantemente expostos à radiação e em todos os lugares, sejam ambientes

domésticos, industriais ou comerciais, ou seja, a exposição é ubíqua. A radiação ionizante está presente em fontes naturais, como radiação cósmica e ultravioleta (solar); fontes antrópicas, como aparelhos eletrônicos e aplicações médicas de diagnóstico (raio-X); e ofícios industriais, como mineração. Dentre todas as fontes de exposição à radiação ionizante, a maior incidente na população é proveniente do meio ambiente (radiação cósmica e ultravioleta), em segundo lugar vem a exposição devido a procedimentos médicos (raio-X, tomografia computadorizada, entre outros), estes aumentaram muito nas últimas décadas, ocupando cerca de 48% da exposição anual na população norte-americana. Com o passar das décadas, a quantidade de exposição à radiação ionizante vem crescendo em diversos ambientes, causando grandes preocupações a respeito dos riscos da exposição excessiva. Para melhor compreensão, é possível observar os dados dispostos em gráficos (Figura 4), os quais fazem um breve comparativo do percentual de exposição à radiação ionizante no período de 1987 e 2009 (EPA, 2016).



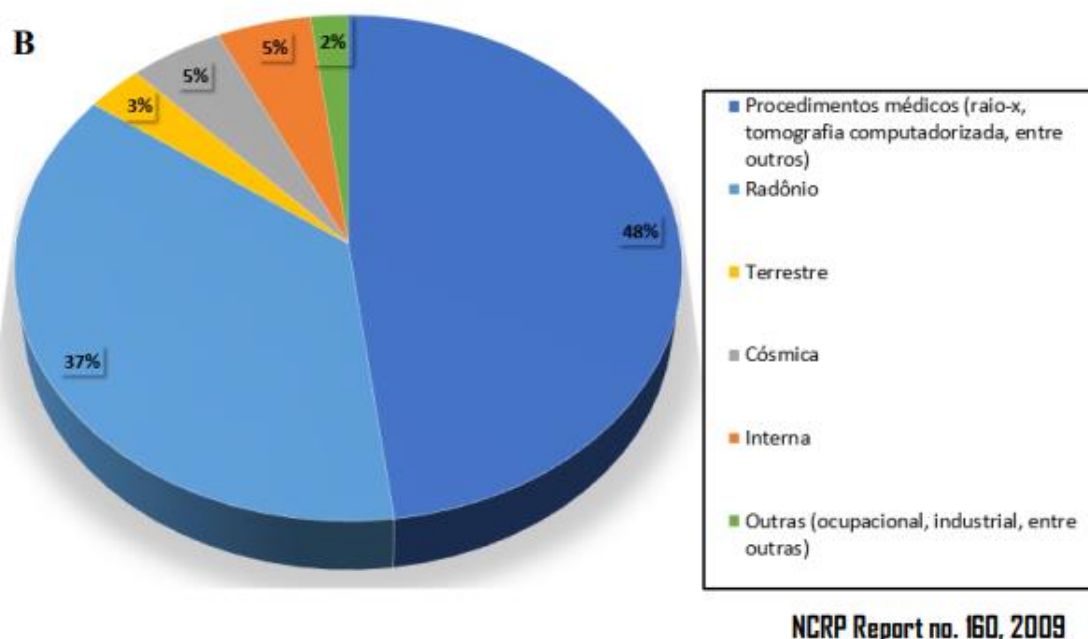


Figura 4. Fontes de exposição à radiação, conforme suas contribuições para uma dose anual e suas respectivas proporções. Fonte: NCRP, 2017.

4.2.1 Radiação Ionizante

A radiação ionizante é definida como a energia que se propaga através do espaço com capacidade de remover elétrons dos átomos, produzindo íons. Os elementos radioativos são substâncias que emitem radiação ionizante em um esforço de alcançar a estabilidade nuclear, tem origem natural ou artificial, e podem ter efeitos danosos à saúde. A estabilidade de um determinado nuclídeo é a consequência do balanceamento entre o número de nêutrons e de prótons localizados no seu próprio núcleo atômico. Os elementos radioativos instáveis que exibem um elevado número de nêutrons no que se refere ao número de prótons sofrem processos de ajustes que convertem um nêutron em um próton, denominado de decaimento beta, ocasionando a emissão de elétrons carregados negativamente ou de partículas betas. O inverso pode ocorrer quando o núcleo tem um número maior de prótons em relação ao número

de nêutrons. Há a alteração desse excesso de prótons em nêutrons, emitindo uma partícula positiva chamada de pósitron (elétron carregado positivamente) (Christensen *et al.*, 2014a).

Há inúmeros tipos de radiações ionizantes, as mais conhecidas são as partículas alfa, betas, pósitrons nêutrons, e as com características de ondas eletromagnéticas, como os raios gama e os raios X. As radiações alfa (α), beta (β) e gama (γ) são diferentes fenômenos e por isso também interagem de forma diferentes com a matéria. Cada tipo de radiação penetra a matéria física de uma forma; nesse contexto, a radiação gama merece destaque, pois, em altas doses, é capaz de afetar o tecido e o material genético dos seres vivos, conforme observado na Figura 5 (IAEA, 2004; Christensen *et al.*, 2014a).

A partícula alfa é considerada um núcleo de hélio, pois é composta por dois prótons e dois nêutrons, sem elétrons, sendo assim carregada positivamente (+2). A radiação beta ocorre de duas formas: quando o núcleo com excesso de nêutrons e falta de prótons transforma um nêutron em um próton mais um elétron, o qual é emitido na denominada emissão β^- , assim mantendo o número de massa e aumentando o número de prótons; ou quando o núcleo com excesso de prótons e falta de nêutrons transforma um próton em nêutron, emitindo um pósitron, resultando na emissão β^+ , assim mantendo o número de massa e diminuindo o número de prótons. Já os raios gama são ondas eletromagnéticas liberadas pelo núcleo ainda excitado, mesmo após o decaimento alfa ou beta, buscando atingir o estado fundamental (L'annunziata, 2016).

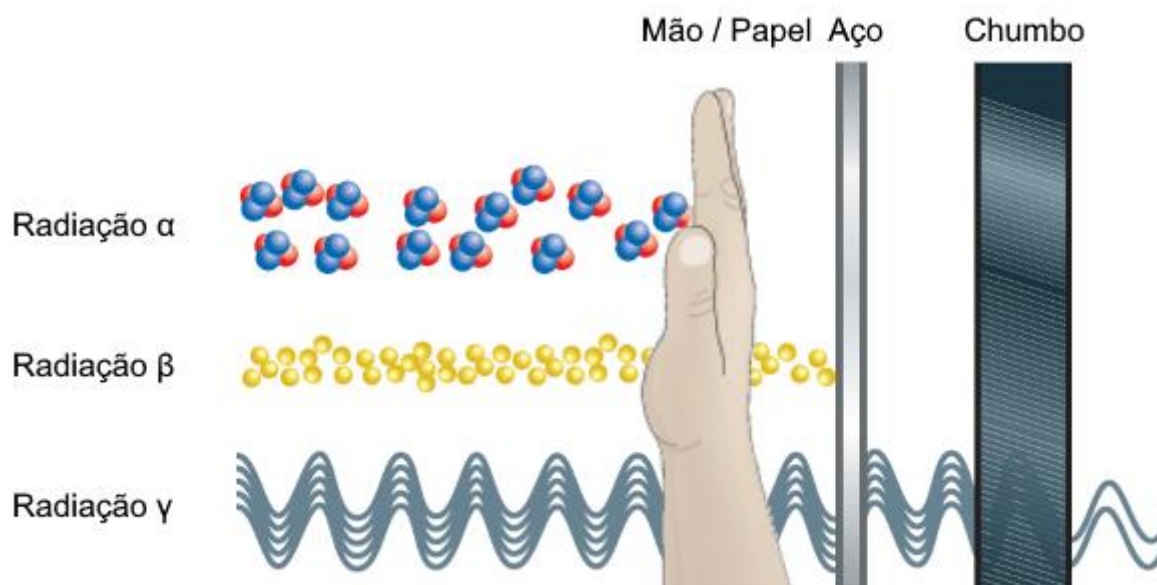


Figura 5. Capacidade de penetração das diferentes radiações. Fonte: Miguel Neta, 2023).

Dentre os três tipos de radiação ionizante, a alfa é a de maior energia (alto poder de ionização) e menor poder de penetração na matéria, sendo barrada por uma folha de papel, por exemplo. A beta possui uma menor energia e um poder de penetração intermediário, sendo barrada pelo corpo humano; e os raios gama possuem uma menor energia e o maior poder de penetração, não sendo barrada nem mesmo por um bloco de chumbo. Assim, compreende-se que os raios gama são os que causam lesões ao corpo humano, consequentemente aos tecidos e suas células. Os raios gama têm a capacidade de alterar a condição física das células e causar diversas complicações, como a alteração fisiológica de organelas e complicações ao DNA, originando mutações e lesões irreversíveis.

Na radiação ionizante, alguns núcleos de metais decrescem pela produção de partículas alfa que consistem em dois prótons e dois nêutrons, idêntico ao núcleo do átomo de hélio, sendo, desta forma, a partícula alfa mais pesada que a partícula beta. Esses decrescimentos, normalmente, não resolvem por completo a questão da instabilidade nuclear e alguns núcleos permanecem com excesso de energia, tornando-se instáveis. Esse excesso precisa ser desviado que, por sua vez, é feito pela emissão de um novo tipo de radiação, conhecida como raios gama (γ) (IAEA, 2004).

4.2.2 Radiação ionizante: comportamento atômico

O átomo é considerado estável quando possui o mesmo número de prótons e nêutrons, sendo a forma do elemento mais abundante na natureza e não é capaz de liberar energia. Já um átomo instável possui um excesso de energia (partículas ou cargas) devido ao desbalanceamento em seu núcleo e precisa emitir radiação para liberar esse excesso (Bushong, 2010).

Como mencionado anteriormente, a radioatividade é um processo no qual um núcleo tem suas quantidades de prótons e nêutrons alteradas (elevadas ou reduzidas) se comparadas com as proporções padrão. Esta instabilidade é chamada desintegração nuclear, sendo acompanhada por emissão de radiação, consequentemente, tornando a matéria radioativa (Bruckmann e Fries, 1991).

A radiação de fundo consiste na radiação ionizante natural, a qual é transmitida por substâncias químicas existentes no solo, água ou ar, estes possuem um núcleo atômico pesado e instável. Urânio, polônio e outros, são exemplos de materiais que liberam energia para alcançar a estabilidade, por isso recebem o nome de elementos radioativos ou radionuclídeos, e a atividade de emitir radiação é chamada de radioatividade (Nuclear, 2005).

É considerada radiação ionizante toda radiação que tem energia suficiente para arrancar elétrons dos átomos ou moléculas ao interagir com a matéria, sejam elas, corpusculares ou eletromagnéticas. Assim, as radiações ionizantes são descritas por sua capacidade de excitar e ionizar átomos do elemento com o qual interagem. Uma vez que a energia necessária para fazer com que um elétron de valência escape de um átomo é da ordem de 4 a 25 eV (elétron-volt), as radiações devem transportar energias cinéticas ou quânticas excedente para serem chamadas de "ionizantes"(Attix, 2004).

Os átomos sofrem transformação radioativa, isto porque os constituintes do núcleo (prótons e nêutrons) não estão dispostos nos estados de energia potenciais mais baixos possíveis; desta forma, ocorre uma organização do núcleo onde esse excesso de energia é emitido e o núcleo modifica-se em um átomo de um novo elemento. Essas modificações são espontâneas e os valores são positivos; se o conjunto de constituintes nucleares está nos estados de energia potenciais mais reduzidos possíveis, a modificação produz um átomo estável; se não, outra modificação deve ocorrer para que a reação mantenha-se em equilíbrio (Attix, 2004).

A melhor forma de compreender a dinâmica das transformações radioativas é considerar núcleos instáveis, ou radioativos, em relação aos que são estáveis naturalmente. O decaimento radioativo mudará de um núcleo para outro se o núcleo do elemento tiver uma energia de ligação nuclear maior do que o núcleo em decaimento inicial. A diferença na energia de ligação determina quais decaimentos radioativos são energeticamente possíveis e quais não são. É importante compreender que a imoderada energia de ligação aparece como energia cinética ou energia de repouso dos produtos de decomposição (Abubakar, 2019).

Desta forma, tratando de emissão e recebimento de radiação, tem-se que um material que emite radiação é chamado de material radioativo, já o que recebe a radiação é chamado de material irradiado. Por exemplo, os elementos são radioativos e os seres humanos são irradiados. Os elementos são determinados e distribuídos na tabela periódica de acordo com o número de prótons no seu núcleo, assim sempre que um elemento emite radiação o mesmo varia o seu número de prótons, portanto transforma-se em outro elemento de propriedades diferentes. Esse fenômeno é conhecido como decaimento radioativo e acontece em uma frequência característica de cada elemento, pois este processo depende do seu número de massa e número atômico.

4.2.3 Transferência Linear de Energia (LET)

Os raios γ , bem como os raios X, são fótons (radiações eletromagnéticas) que não possuem massa. Por essa razão, não são muito eficientes na ionização dos átomos, sendo muito mais penetrantes do que partículas alfa e beta. Geralmente, os raios γ são mais energéticos do que os raios X e são considerados mais penetrantes. Essa radiação é fisicamente classificada de baixa transferência de energia, a qual ocorre de maneira linear (IAEA, 2011; Christensen *et al.*, 2014).

Como as radiações ionizantes são apresentadas de diversas formas, variando de ondas eletromagnéticas (radiações de baixa densidade de ionização) até partículas eletricamente carregadas (densamente ionizantes), elas são classificadas de acordo com sua densidade de ionização em termos de transferência linear de energia (LET) (Loucas *et al.*, 2013).

A Transferência Linear de Energia (LET, *Linear Energy Transfer*) é definida como a quantidade média de energia depositada, por colisão de uma partícula

carregada, por unidade de comprimento do percurso. Definir a LET de cada tipo de radiação é importante para entender a forma como as ionizações ocorrem na matéria (Figura 6), pois radiações de baixa LET resultam em uma distribuição aleatória de ionizações dentro de um volume alvo, enquanto as radiações de alta LET produzem ionizações espaçadas que são distribuídas densamente. Em termos biológicos, as radiações de alta LET provocam mais danos do que a de baixa LET, como alterações nas organelas celulares e lesões teciduais (Kawata *et al.*, 2004; IAEA, 2011)

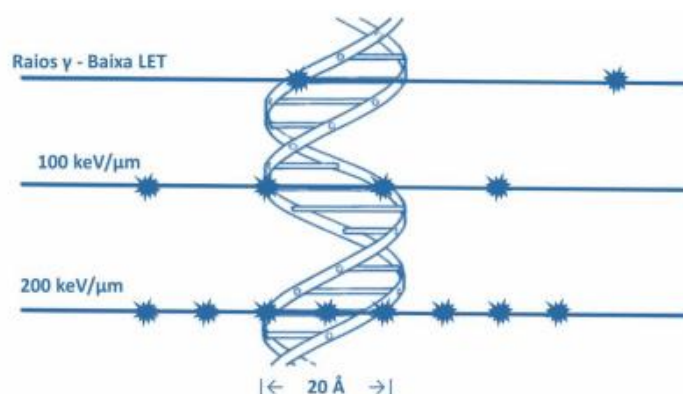


Figura 6. Distribuição espacial média de eventos ionizantes para diferentes valores de LET em relação à estrutura de dupla hélice do DNA (Fonte: Hall; Giaccia, 2005 apud Beukes, 2012).

Os raios X ou a radiação γ depositam quantidades médias de energia muito pequenas por unidade de comprimento e, por esse motivo, exigem um maior número de influências em sua trajetória para produzir uma mesma dose absorvida que as partículas carregadas com elevado grau de ionização, tais como, partículas alfa, íons pesados e nêutrons. Desta forma, os raios X são considerados radiações de baixa LET e a radiação gama, de alta LET (Loucas *et al.*, 2013).

Radiações de alta LET também produzem elétrons secundários de baixa LET que emanam radialmente da trajetória principal. No caso das partículas alfa de energia mais baixa, esses elétrons secundários têm o comprimento de raios limitado em alguns nanômetros, o que impede a sua interação com os danos produzidos por outras trajetórias primárias, pois estas são independentes. Devido a essas características, as radiações de baixa LET resultam em uma distribuição aleatória de ionizações dentro do destino, enquanto as radiações de alta LET produzem espaçadas ionizações que são densamente distribuídas (IAEA, 2011).

4.2.4 Interação da radiação ionizante com a matéria

As radiações ionizantes têm energia suficiente para produzir partículas carregadas (íons) por meio da remoção de elétrons carregados negativamente em outro elemento químico. Essa habilidade de ionização das radiações pode ser visualizada em qualquer molécula. Dependendo do grau de ionização, as moléculas podem perder suas funções, inclusive nas moléculas biológicas como exemplo a cadeia DNA, considerando que a ionização é capaz de alterar a estrutura química dos materiais (Christensen *et al.*, 2014a).

A classificação das radiações é importante, pois cada tipo interage de maneira específica com a matéria. Os fótons de Raios X ou gama podem interagir depositando toda sua energia em interações elétricas-fotoelétricas (absorção fotoelétrica), por processo de espalhamento Compton (evento físico decorrente da interação de um fóton de alta energia com um elétron livre), ocorrendo o depósito de apenas uma porção da energia ou por produção de par (Quadro 2). Quando a energia de um fóton é concentrada por um elétron, este deposita sua energia cinética na matéria circundante à medida que se move através do elemento (Baker-Jarvis; Kim, 2012).

Interação - símbolo da seção de choque	O que muda no meio	O que muda na radiação incidente	Radiação ionizante produzida
Espalhamento coerente (espalhamento da radiação pelo átomo)	Sem alterações.	Direção de propagação (mantém a energia).	REM espalhada de mesma energia.
Fotoelétrico (ejeção de elétron ligado)	Ionização e excitação do átomo, recuo do núcleo.	Fóton é absorvido.	Elétron rápido, raios X característicos, elétrons Auger.

Compton (espalhamento do fóton por um elétron)	Ionização do átomo.	Fóton perde energia e muda de direção.	Elétron rápido, fóton com menor energia espalhado.
Produção de par (energia do fóton é consumida na criação do par (e+) (e-))	Reco do núcleo; aniquilação do pósitron.	Fóton é absorvido.	Elétron e pósitron rápidos, Raios X de aniquilação.
Reação fotonuclear (ejeção do núcleo ligado)	Núcleo modificado (Z ou A) e excitado.	Fóton é absorvido.	Partículas subnucleares, em geral nêutrons.

Quadro 2. Os diversos tipos de interações e de consequências de acordo com o tipo de radiação ionizante, Raios X e γ (Fonte: Adaptado de Yoshimura, 2009).

As radiações ionizantes são apresentadas de diversas maneiras, assim, podem ser classificadas de acordo com sua densidade de ionização e transferência linear de energia (Loucas et al., 2013). Os núcleos acelerados (íons) manifestam radiação densamente ionizante com alta transferência de energia linear (LET) e são descritos por maior eficácia biológica relativa (RBE) em confronto com a radiação reduzidamente ionizante como fótons ou prótons de alta energia (Burigo *et al.*, 2016).

A radiação γ interage com a matéria por meio de algumas atividades, dentre elas: a absorção fotoelétrica, o efeito ou espalhamento Compton e a produção de par. Essas três atividades de interação conduzem à transferência parcial ou total da energia do fóton de radiação γ para o elétron, originando alterações na trajetória do fóton, onde o fóton pode expirar ou mudar de direção (Knoll, 1999).

No processo de absorção fotoelétrica, um fóton relaciona-se com um elétron do átomo do meio absorvedor, ocasionando o completo desaparecimento do fóton.

Em sua posição surge um fotoelétron que é ejetado pelo átomo com uma energia cinética bem delimitada. Para raios γ , com energia suficiente, a origem mais provável do fotoelétron é o orbital mais próximo ao núcleo, a camada eletrônica K do átomo. Além do fotoelétron, o átomo alvo se torna ionizado com a ausência desse elétron e a vacância originada é imediatamente preenchida por algum elétron de camadas eletrônicas mais externas. Esse último processo leva à geração de fótons de raios X específicos (Knoll, 1999).

No espalhamento Compton, o fóton, ao relacionar-se com o átomo, é afastado de sua trajetória inicial por um ângulo associado a quantidade de energia transferida ao elétron (que presume-se estar inicialmente em repouso), conhecido como elétron de recuo. A energia ofertada para o elétron pode variar de zero a uma grande fração da energia dos raios γ incidentes de tal maneira que pequenos ângulos de espalhamento do fóton equivalem a uma pequena fração da energia transmitida (Knoll, 1999).

Por fim, o processo de produção de par apenas ocorrerá se a energia do raio γ for superior a duas vezes a energia de repouso da massa do elétron (1,02 MeV), de modo que a possibilidade de acontecimento dessa interação é muito baixa, a fim da energia dos raios γ se aproximem a vários MeV (Megaelétron-volt). Desta forma, o processo de produção de par está predominantemente confinado aos raios γ de alta energia. Na interação com os núcleos de número atômico elevado, o fóton dissipa-se e surge um par elétron-pósitron (antipartícula do elétron) e toda energia excedente transportada pelo fóton (acima de 1,02MeV) é transformada em energia cinética no pósitron e no elétron. Posteriormente, o processo de aniquilação ocorre, onde um pósitron encontra um elétron no meio absorvedor, ocasionando o desaparecimento de ambas as partículas, com isso, dois fótons de aniquilação são produzidos (Knoll, 1999).

4.3 RADIAÇÃO IONIZANTE E O DNA HUMANO

O modelo estrutural do DNA, desenvolvido por James Dewey Watson e Francis Harry Compton Crick, é um dos mais conhecidos e utilizados na biologia. Esse modelo desempenhou grande função nos estudos envolvendo o DNA e a hereditariedade e permitiram a evolução da Biologia Molecular, durante a segunda metade do século XX. A molécula de DNA presente no material genético traz as informações que

orientam o desenvolvimento dos organismos vivos e a manutenção da vida, seu genótipo, fenótipo e atividade fisiológica. O genoma armazena as informações necessárias para a construção dos RNAs e das proteínas e também é responsável por transmitir as características dos pais para os filhos. As fitas de DNA são longos biopolímeros formados por milhões de nucleotídeos ligados uns aos outros. Os nucleotídeos são estruturas simples, consistindo de três partes distintas: uma base nitrogenada, um açúcar pentose (um açúcar de cinco carbonos) e um grupo fosfato. As bases nitrogenadas são quatro: Adenina (A), Timina (T), Citosina (C) e Guanina (G) (Scheid, N. M. J., Delizoicov, D.; Ferraril, N., 2003).

Adenina e guanina são purinas, ou seja, são moléculas constituídas por dois anéis de carbono. Citosina e timina são classificadas como pirimidinas, e são moléculas formadas por um único anel de carbono. Os nucleotídeos são ligados entre si por meio de ligações fosfodiéster, já as bases nitrogenadas interagem entre si por ligações de hidrogênio (H), a Adenina liga-se à Timina por meio de duas ligações de H, e a Citosina e Guanina estão interligadas por meio de três ligações de H. Apesar dos ligamentos de H existirem para garantir a estrutura de dupla hélice do DNA, essas ligações são quimicamente fracas, assim, alterações na carga das moléculas, no pH ou na temperatura do meio podem desnaturar a dupla fita, rompendo as ligações de H e tornando a estrutura do DNA em uma fita única (Scheid, N. M. J., Delizoicov, D.; Ferrari, N., 2003).

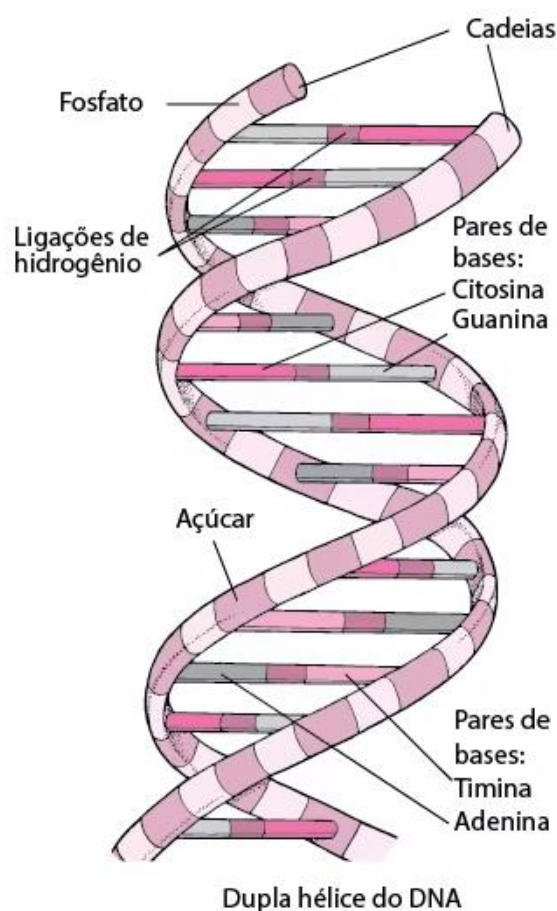


Figura 7. Estrutura dupla hélice do DNA desenvolvido por James Dewey Watson e Francis Harry Compton Crick. Fonte: MSD, 2023.

Em consequência da diversidade da natureza das moléculas e dos modos de interação físico-química, a energia transferida das partículas ionizantes nem sempre é absorvida completamente pela matéria-alvo. Desse modo, pode ser estabelecida uma proporção entre a energia absorvida, ou seja, a energia depositada pela radiação em um ponto do alvo definido, e a massa do volume do material atingido. Essa relação é determinada como Dose Absorvida (DA), a unidade de medida é J/Kg (joules por quilo) ou Gray (Gy). Na interação da radiação ionizante com amostras biológicas vivas, utiliza-se a grandeza Dose Equivalente (DE), esta é dada pela dose absorvida multiplicada por um fator de qualidade Q, ele constitui o valor adimensional sintetizado que caracteriza as diferentes categorias de radiação, na indução de consequência biológica. A unidade de medida também é J/Kg, mas é denominada como Sievert (Sv) (Tauhata *et al.*, 2014).

A fração de energia absorvida pelas células do corpo tem a capacidade de relacionar-se com seus átomos e moléculas causando alterações pontuais. No momento em que a radiação é integrada ao corpo, esta tem a maior possibilidade de colidir-se com a água, ou com o DNA, sendo estas duas colisões responsáveis pelas categorias de efeitos que a radiação tem no organismo. Ao interagir com a água a radiação influenciará o efeito indireto, no qual essa interação acarretará na radiólise da água, gerando espécies químicas reativas (radicais livres), que irão oxidar proteínas, lipídios e ácidos nucleicos, afetando as bases nitrogenadas e causando danos no DNA. Por outro lado, ao interagir com o DNA, a radiação provoca o chamado efeito direto, acarretando diversas alterações na molécula, como a quebra das ligações de hidrogênio que unem as bases nitrogenadas, assim ocorre o rompimento da dupla fita de DNA. O processo de interação entre a radiação ionizante e a água presente nas células pode ser observado no esquema ilustrado na Figura 8 (Robertson *et al.*, 2013).

Ambos os efeitos culminam em alterações bioquímicas e severas consequências para o organismo, as quais induzem sinalizações moleculares a fim de reparar esses danos, mas caso o reparo não seja obtido os danos resultam em alterações fisiológicas permanentes como mutação. Portanto, poderá ocorrer até a morte celular, que compromete tecidos e órgãos (Azzam *et al.*, 2012).

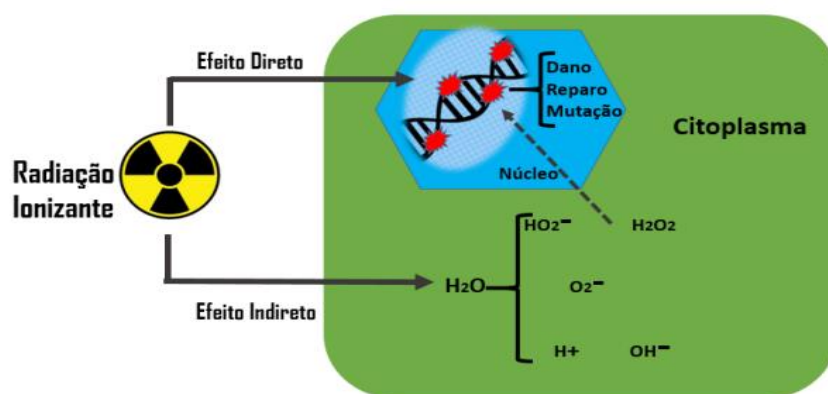


Figura 8. Efeitos celulares da radiação ionizante. Representação esquemática tanto do efeito direto, quanto do efeito indireto. Fonte: adaptada de Azzam *et al.*, 2012.

Devido a essa atividade prejudicial aos tecidos vivos, muitos estudos *in vitro*, *in vivo* e epidemiológicos provêm fortes indícios de associação entre a exposição à IR e o aumento do risco de desenvolver algum tipo de câncer, e estudos recentes têm associado também a RI ao desenvolvimento de doenças degenerativas e cardiovasculares (Little *et al.*, 2010; Baker *et al.*, 2011).

As consequências à saúde humana e de outros seres vivos quando expostos à RI ficou mais evidente após estudos genéticos baseados em consequências de desastres radioativos, como as bombas atômicas lançadas na Segunda Guerra Mundial, e acidentes radioativos, como a explosão do quarto reator nuclear em Chernobyl e o incidente com cloreto de cério (Cério-137) em Goiânia, Brasil. Apesar dessas catástrofes serem casos específicos que ocorreram e podem ser considerados como eventos pouco comuns de exposição, os estudos em genética baseados nas mutações provenientes da exposição à radiação ionizante evoluíram bastante na área física, química e biológica, gerando material de estudo e diversas hipóteses de como o DNA humano seria afetado após a exposição (Hamza, 2008).

Em meados de 1950, os estudos reportaram que existiam duas teorias sobre as atividades de ação da radiação em organismos vivos: as teorias de ação direta e indireta (Figura 9). Esses conceitos podem ser aplicados no rompimento de fita dupla (DSB, *Double-strand break*) no DNA, logo, temos que na ação direta, as DSBs são resultantes de uma disposição única de energia que produz concomitantemente a lesão nas duas fitas do DNA. Outra possível atividade de ação direta é a formação de DSBs resultantes de duas ou mais interações distintas da radiação com a célula, que pode ocorrer mediante a ionização das moléculas, alterações químicas e formação de radicais livres, esses processos podem ocorrer em conjunto ou de forma isolada. Por outro lado, na ação indireta, as DSBs originam-se de um único ataque dos radicais livres. Existem evidências que a ação indireta é o mecanismo dominante de formação de DSB pelas radiações de baixa LET. A ação direta é essencialmente dependente das características físicas do processo de interação, tais como as propriedades da radiação (LET) e o tamanho do alvo (DNA), o que influencia na quantidade de radiação emitida ao alvo (Hamza, 2008).

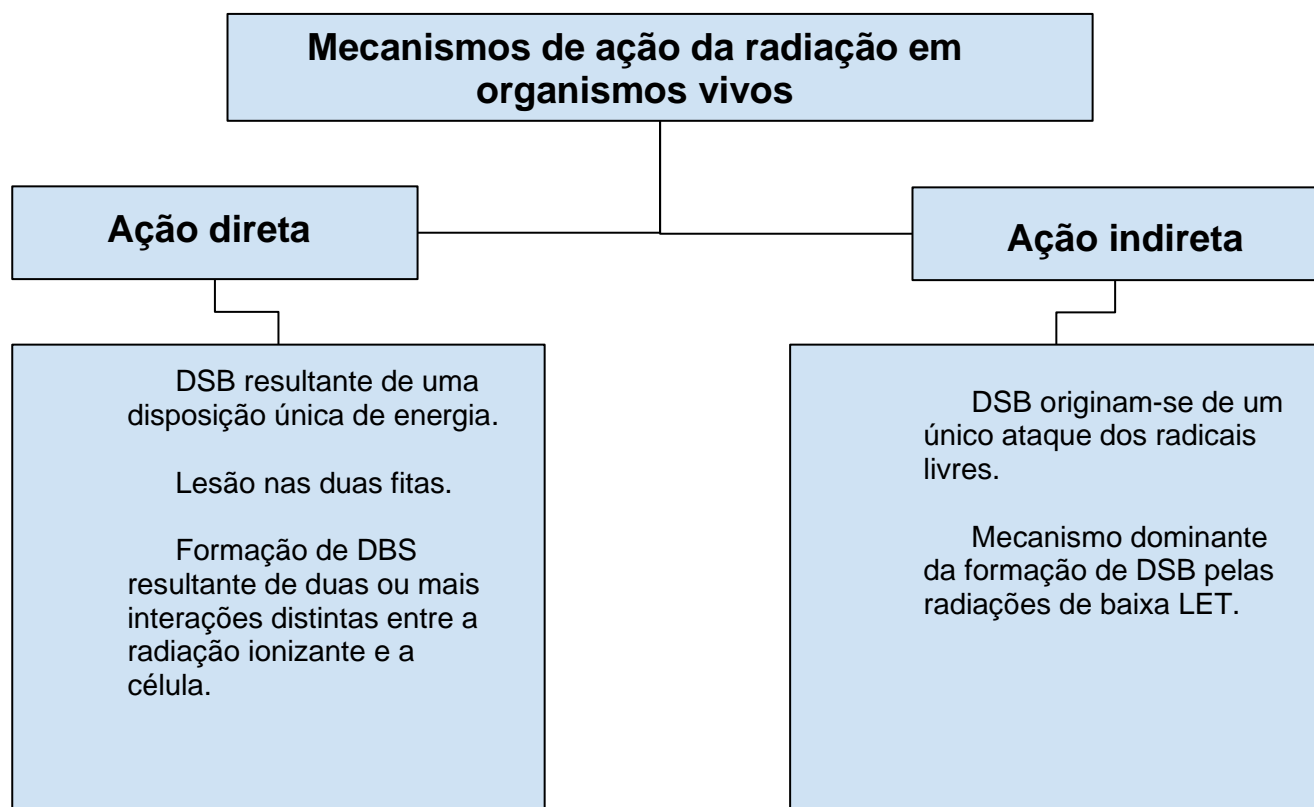


Figura 9. Mecanismos de ação da radiação em organismos vivos (Fonte: Hamza, 2008).

Nos mecanismos de ação da radiação, o tamanho do alvo é constante em todas as células humanas. Teoricamente, cerca de 40% das DSBs produzidas são geradas devido a quebra das ligações químicas, como rompimento das ligações de hidrogênio, quebra das ligações fosfodiéster e interrupção de processos bioquímicos. Os restantes 60% podem ser estabelecidos pelas propriedades biológicas das células, incluindo a capacidade de regeneração, o estado de condensação da cromatina (divisão celular), a atividade fisiológica (respiração celular, síntese de proteínas, lipídios e carboidratos) e o grau de maturação celular. Assim, uma característica importante da biologia das radiações é a condição bioquímica do ambiente do DNA que define uma influência marcante sobre a sua radiosensibilidade da célula e de suas organelas. Ou seja, o estado biológico da célula influencia no processo de ionização causado pela radiação. Quanto mais instável a célula estiver, mais a radiação poderá alterar as suas propriedades. No caso do DNA, o núcleo celular é o principal alvo da radiação, portanto o seu equilíbrio biológico é um fator importante que pode reduzir as chances de alterações causadas pela ionização (Lara *et al.*, 2013).

Nesse contexto, mediante a análise de pesquisas desenvolvidas na área de genética, há diversos tipos de lesões induzidas pela radiação ionizante ao DNA, dentre as quais estão o rompimento de fita única (SSB, *single-strand break*), a quebra de fita dupla (DSB, *double-strand Break*), a modificação de bases nitrogenadas (adenina, citosina, timina e guanina) via oxidação, a alquilação e a desaminação. Existe, inclusive, a perda de resíduos de base na produção de sítios apurínico ou apirimidínico, ligações cruzadas abrangendo DNA-DNA e relações DNA-proteína (Budworth *et al.*, 2012).

Como visto, ao interagir de maneira constante e intensa com o organismo, a radiação ionizante pode causar sérias lesões a nível celular, como a DSB. Todas as radiações ionizantes podem gerar a DSB, todavia, as radiações de alta LET em comparação à baixa radiação LET, induzem DSBs que não são reparadas pelos processos celulares ou que são mais difíceis de reparar. Desta forma, os mecanismos para produzir rearranjos cromossômicos envolve a interação de duas lesões, desta forma pode-se esperar que a probabilidade de uma DSB seja desajustada dependente do número de rompimentos próximos e do nível de dose de radiação absorvida pela célula. Os resultados analisados para a radiação ionizante (baixa LET), como Raios X, ilustram que uma separação de DSBs no espaço e no tempo restringe consideravelmente a possibilidade de erro na ligação com outras DSBs. Portanto, é razoável postular que as quebras de diferentes DSBs têm que coincidir no tempo e na dose de radiação absorvida, para existir a interação e a formação de rearranjos genômicos, como observado na Figura 10 (Lara *et al.*, 2013).

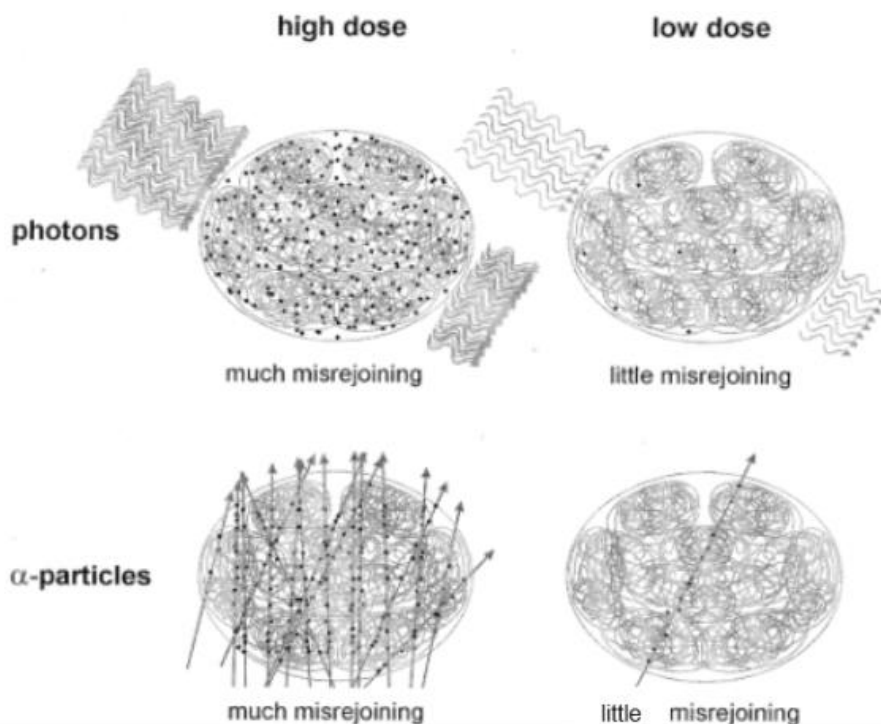


Figura 10. Ilustração esquemática da distribuição espacial de DSBs (*Double-strand Break*). A distribuição espacial de DSBs (pontos pretos) dentro de uma área seccional do núcleo celular após altas e baixas doses de radiações espacialmente (fótons) e densamente ionizantes (partículas). O DSB *misrejoining* é observado quando a formação de DSBs coincidir no tempo e no espaço. Esta situação é encontrada após doses de radiação elevadas após a passagem de uma única partícula que gera DSB correlacionados ao longo da trajetória (Fonte: Rothkamm; Lobrich, 2002).

O genoma além de estar ameaçado por fatores ambientais, devido às exposições à radiação ionizante, pode estar exposto a erros de replicação e bloqueio, que levam a alteração de suas propriedades físicas e de suas estruturas químicas, impedindo, assim, sua mensagem codificada. A estabilidade do DNA é de grande importância para a manutenção da vida, assim as células adaptaram toda uma estratégia em resposta ao dano no DNA. Prejuízos ao DNA incluindo a atividade de moléculas efetoras que estimulam as vias de proteção ao genoma, ou seja, vias ligadas aos reparos de DNA, autocontrole do ciclo celular, apoptose, transcrição do RNA e à remodelação da cromatina, podem desencadear sérias lesões que não podem ser corrigidas (Belloni *et al.*, 2008; Lagerwerf *et al.*, 2011).

As alterações na sequência de DNA podem ser mantidas nas divisões celulares por todo o tempo de vida da célula e até mesmo por várias gerações. De acordo com os hábitos de vida, o ambiente social em que o indivíduo está inserido e a exposição à radiação, podem ocorrer diversas alterações químicas no DNA e nas proteínas que o envolvem, afetando as funções de alguns genes. Essas desconformidades podem ser desencadeadas no genoma de um indivíduo em qualquer momento de sua vida, levando ou não ao desenvolvimento de determinadas patologias. A incapacidade de enfrentar corretamente uma ameaça genômica ocasiona a instabilidade que, eventualmente, conduz à transformação tumoral ou até a doenças hereditárias. (Belloni *et al.*, 2008; Kavanagh *et al.*, 2013).

4.4 RADIOPROTEÇÃO

A radioproteção ou proteção radiológica é descrita como o conjunto de princípios e medidas que visam evitar exposições desnecessárias à radiação com a finalidade de proteger o ser humano e seus descendentes, assim como o meio ambiente das possíveis consequências causadas pela radiação ionizante (ICRP 75, 1997; VOISIN *et al.*, 2004).

Os primeiros ensinamentos para a radioproteção foram discutidos no Segundo Encontro do Congresso Internacional de Radiologia, em 1928. Neste encontro, surgiu a formação da Comissão Internacional de Proteção Radiológica – ICRP. Ao quantificar essa exposição, a ICRP (1960) sugeriu a utilização de duas grandezas, que mantêm relação com os conceitos de dose física: a dose equivalente e a dose efetiva (Quadro 3).

Grandeza em dosimetria	Unidade	Definição de expressão	Aplicação
Dose absorvida	Gray (Gy)	Mede a quantidade de energia absorvida no tecido do indivíduo.	Avalia o potencial do risco biológico em um tecido específico.
Dose equivalente	Sievert (Sv)	É a dose média	É a unidade mais

		absorvida no tecido relacionado com os fatores de ponderação para os diferentes tipos de radiação.	utilizada para medir o risco de determinada radiação em um tecido específico na proteção individual.
Dose efetiva	Sievert (Sv)	Converte qualquer absorção local ou dose equivalente para o fator de risco do corpo inteiro.	Permite comparar o risco entre várias exposições individuais e a distribuição da dose em diferentes órgãos.

Quadro 3. Principais grandezas da dosimetria utilizada na radioproteção (Fonte: Hirshfeld *et al.*, 2004).

A compreensão dos níveis de doses em radioproteção é um passo significativo para a avaliação das consequências associadas às exposições individuais ou coletivas. Com isso, instituições internacionais recomendam limites de doses para indivíduos, trabalhadores e membros do público, objetivando restringir os riscos decorrentes da exposição excessiva (Voisin *et al.*, 2004).

Atualmente, a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (International Commission on Radiological Protection - ICRP) recomenda o limite de dose em exposição ocupacional, de 20 mSv por ano, num período de 5 anos, com a restrição de que a dose absorvida não pode exceder os 50 mSv em um único ano. Essas quantidades de dose absorvida inclui a classe dos trabalhadores, espaços de lazer e ambientes domésticos. Desta forma, para que este limite não seja ultrapassado, há três princípios gerais da ICRP a serem seguidos: justificação, otimização e limite de dose. O princípio da justificação determina que nenhuma prática que envolva exposição à radiação deve ser adotada, com exceção de que a exposição beneficie o indivíduo ou à sociedade. A otimização e limite da dose relaciona-se ao fato de que a exposição à radiação deve se tornar o mais baixo possível, dentro do limite

estabelecido. Estes três princípios foram propostos para que fosse possível estabelecer um controle do risco nas exposições individuais a partir de um limite da dose.

Em atividades de lazer e cultura, os responsáveis pelas atividades desenvolvidas devem manter a segurança geral no ambiente recreativo, a fim de estimular e fortalecer atitudes que contribuam para aprimorar a radioproteção e a segurança radiológica. Desta forma, os organizadores devem assegurar a execução das atividades com fontes de radiação ionizante, visando a proteção à saúde e ao meio ambiente, além de buscar minimizar os riscos de possíveis males oriundos da exposição, prevenindo acidentes e mitigando suas consequências, tanto no presente como no futuro. Desta forma, considerando as atividades fornecidas por empresas ou atividades particulares/individuais, é de grande importância a educação radiológica e o amplo acesso à informação como forma de minimizar as consequências da exposição (Voisin *et al.*, 2004).

Com a finalidade de reduzir os riscos da exposição à radiação ionizante no ambiente doméstico, é necessário que os itens elétricos e compostos químicos sejam próprios para o uso domiciliar. Deve-se restringir os equipamentos e utensílios que emitem elevada dose de radiação ionizante aos ambientes industriais, de acordo com as medidas de segurança e correta supervisão. Os indivíduos ocupacionalmente expostos devem seguir as regras e procedimentos aplicáveis à radioproteção e segurança radiológica especificados pelas partes responsáveis, incluindo a participação em treinamentos relativos à radioproteção e segurança radiológica, acesso à informação para que saibam tomar as devidas providências em acidentes e desastres (Boice *et al.*, 2006).

Com relação aos conceitos básicos de radioproteção que podem ser aplicados na monitoração e controle de saúde do trabalhador, há a recomendação do uso de dosímetros individuais e equipamentos de proteção individual (avental, luvas, protetor de tireóide e óculos) de material equivalente ao chumbo. Além do uso dos equipamentos protetores, devem-se realizar investigação da dose efetiva mensal superiores a 1,5 mSv em indivíduos que trabalham em mais de um serviço. Além disso, as medidas devem ser tomadas de modo a garantir que a soma das exposições ocupacionais não ultrapassem os limites de doses estabelecidos. É importante compreender que os controles periódicos de saúde não substituem o programa de monitoração individual, ambos devem ser utilizados de maneira conjunta, garantindo

a eficácia da radioproteção. O treinamento profissional também é considerado importante, visto que a recomendação fornecida pela ICRP é a promoção constantemente de capacitação, a fim de mitigar erros e falhas (Boice *et al.*, 2006).

5 METODOLOGIA

A pesquisa corresponde a uma revisão integrativa da literatura referente à radiação ionizante e suas influências na alteração molecular e genética do DNA. Para a construção deste estudo foram respeitadas as seguintes etapas: (1ª) identificação do tema, seleção da hipótese e questão de pesquisa; (2ª) estabelecimento de critérios para inclusão e exclusão de estudos/amostragem ou pesquisa de literatura; (3ª) avaliação dos estudos incluídos na revisão integrativa; (4ª) definição das informações a serem extraídas dos estudos selecionados/categorização dos estudos ; (5ª) interpretação de resultados e (6ª) apresentação da revisão/síntese do conhecimento (Sousa *et al.*, 2017). A pergunta norteadora do processo revisional ficou definida: Como foi a produção científica nos últimos 25 anos em relação aos danos causados pela radiação ionizante no DNA humano?

Para realizar a etapa 4, foram selecionadas as revistas de interesse e feita a busca com as palavras chave pré definidas mediante a área de interesse. Em seguida, os artigos foram selecionados após a leitura do título e resumo. Por fim, os trabalhos foram lidos na íntegra e, assim, incluídos nesta pesquisa.

Para a pesquisa de artigos científicos que atendessem aos critérios de pesquisa, os dados foram estruturados no formato de quadro, a fim de facilitar a compreensão, e foram subdivididos quanto à natureza da base de dados (revistas científicas, periódicos nacionais/internacionais e repositórios de universidades federais brasileiras), palavras-chave e número de artigos encontrados para cada categoria de busca. Após a pesquisa, foram geradas duas tabelas, uma com os resultados obtidos para artigos em ciências biológicas e outra com os resultados obtidos para trabalhos na área de física; a representação para seleção da base bibliográfica pode ser observada nos Quadros 5, 6 e 7.

5.1 ESTRATÉGIA DE BUSCA

Os critérios de busca de artigos nos periódicos foram definidos de acordo com as palavras-chaves recorrentes nos assuntos abordados na pesquisa. As palavras-chave foram estabelecidas mediante o respectivo campo de pesquisa como observados no Quadro 4. As áreas de estudo contempladas foram Física e Ciências

biológicas, considerando que a esfera da Física está inserida em ciências exatas e naturais e Ciências Biológicas contempla as áreas de biologia e saúde.

Área de pesquisa	Palavras-chave/ estratégia de busca
Física/ Ciências	<p>Conceito/tipos de Radiação/ Radiação Ionizante;</p> <p>Interação molecular/atômico da radiação/radiação ionizante com a matéria;</p> <p>Atuação/ importância dos Radioisótopos/ Radionuclídeos/ Nuclídeos radioativos;</p>
Ciências Biológicas/ Biologia/ Saúde	<p>Estrutura/ composição do DNA/genoma/material genético;</p> <p>Efeitos/ alterações/ consequências da radiação ionizante no DNA/genoma/material genético;</p> <p>Alterações gênicas/mutações/fenotípicas causadas pela radiação ionizante;</p> <p>Contaminação radioativa;</p> <p>Conceitos/Princípios/Unidades e grandezas de radioproteção;</p>
Interdisciplinar (Física/Ciências/Biologia/Saúde)	Conceito/tipos de Radiação/ Radiação Ionizante;

	<p>Interação molecular/atômico da radiação/radiação ionizante com a matéria;</p> <p>Atuação/ importância dos Radioisótopos/ Radionuclídeos/ Nuclídeos radioativos;</p> <p>Estrutura/ composição do DNA/genoma/material genético;</p> <p>Efeitos/ alterações/ consequências da radiação ionizante no DNA/genoma/material genético;</p> <p>Alterações genéticas/genotípicas/fenotípicas causadas pela radiação ionizante;</p> <p>Contaminação radioativa;</p> <p>Conceitos/Princípios/Unidades e grandezas de radioproteção;</p>
--	--

Quadro 4. Estratégia de busca.

5.2 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO

Para selecionar os periódicos de pesquisa, foram definidos critérios de inclusão e de exclusão, a fim de definir um filtro direto e eficaz de apuração bibliográfica. Dentre os critérios de inclusão, os periódicos foram aceitos mediante classificação QUALIS A1 (classificação de periódicos quadriênio 2017 a 2020) da Plataforma Sucupira, os artigos publicados entre os anos 2000 e 2024 e tema desenvolvido dentro da área de pesquisa. A escolha do ano de partida deve-se ao início e ano atual do século,

considerando que um dos objetivos da pesquisa é analisar trabalhos publicados durante este período. O idioma do trabalho não foi um motivo de exclusão da pesquisa, ou seja, os artigos selecionados estavam disponíveis no idioma português, inglês ou espanhol. Os critérios de exclusão foram definidos como todos os trabalhos que não atenderam aos critérios de seleção, ou seja, com classificação QUALIS A2, A3, A4 ou inferior, publicados antes dos anos 2000 (século 20) e com temática em outras áreas de interesse. Também foram excluídos os resumos apresentados em eventos científicos, estudos de caso e publicações repetidas em base de dados distintas.

A escolha do critério de seleção ser artigos de periódicos classificados como Qualis A1 justificou-se pela amplitude de trabalhos apresentados nas diversas classificações A2, A3, A4, B1, B2, B3, B4, B5 e C, como apresentado pela Tabela 5. Ao todo, foram selecionados 48 periódicos Qualis A1 para busca das palavras-chave, resultando em 68 artigos encontrados na área de Ciências Biológicas e Física. Posteriormente, as pesquisas foram submetidas aos critérios e seleção apresentados pela Figura 11.

Classificação QUALIS	Número de periódicos por classificação	Artigos encontrados dentro dos critérios de seleção
A1	17	63
A2	41	54
A3	35	29
A4	23	31
B1	15	9
B2	11	7
B3	18	17
B4	2	0

B5	0	0
C	12	10
TOTAL	205	220

Tabela 1. Periódicos com classificação Qualis e seus respectivos artigos na área de Ciências Biológicas e Física.

Como observado na Tabela 1, foram encontrados, ao todo, 205 periódicos com classificação Qualis, resultando em 220 artigos na área de interesse. Desta forma, evitando ampliar o tema de pesquisa e filtrar artigos com maior visibilidade e qualidade, restringiu-se a pesquisa e leitura dos artigos encontrados em periódicos Qualis A1. Apesar do número de artigos utilizados para revisão, o objetivo central da pesquisa não foi prejudicado.

Os critérios de seleção podem ser observados na Figura 11, organizados na forma de fluxograma para facilitar a compreensão.

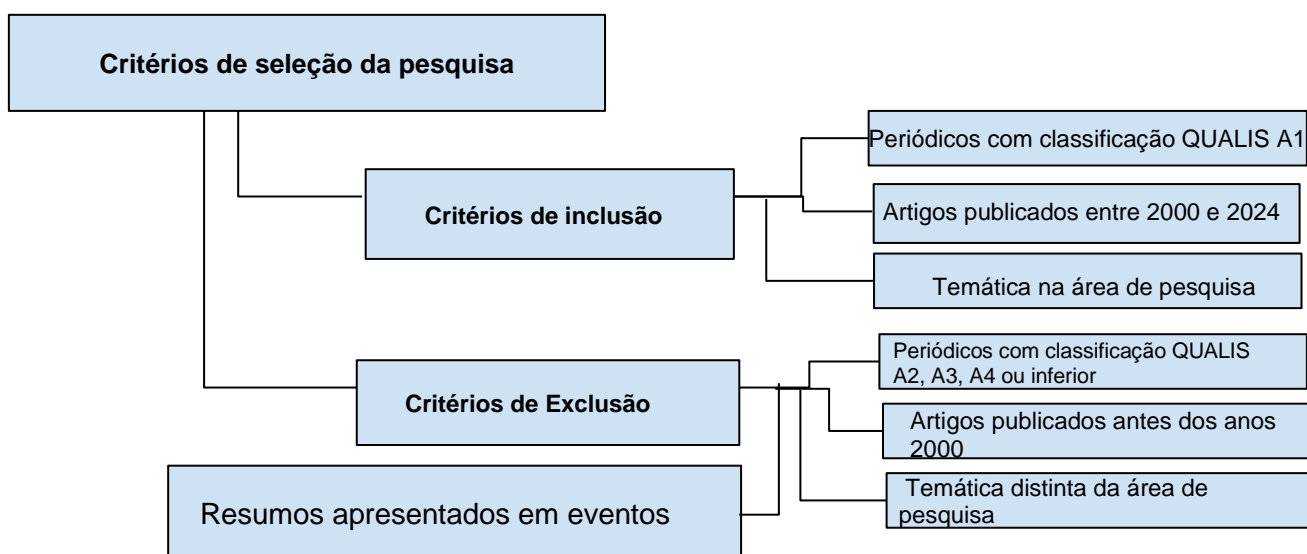


Figura 11. Critérios de seleção da pesquisa.

6 RESULTADOS

6.1 ARTIGOS SELECIONADOS

A seleção foi feita em dois momentos no mês de setembro de 2024, no primeiro momento pesquisou-se periódicos na área de ciências biológicas e interdisciplinares, no segundo momento pesquisou-se periódicos em física e ciências. No primeiro momento, considerou-se os seguintes critérios de pesquisa: classificação de periódicos quadriênio 2017 a 2020, área de avaliação em Ciências Biológicas I e classificação A1. A plataforma apresentou como resultado 1126 periódicos nacionais e internacionais, destes apenas 15 foram selecionados. Considerou-se apenas os periódicos com classificação na área mãe de ciências biológicas e interdisciplinar. Os resultados da seleção de periódicos em Ciências Biológicas, apresentado pela Quadro 5, mostra de maneira respectiva o número de artigos encontrados (amostra inicial) de acordo com o tema de pesquisa e os artigos selecionados (amostra final) após leitura do resumo e da fundamentação teórica do trabalho, sendo analisados e incluídos na pesquisa.

Número de Seleção	Periódicos/ revistas	Artigos encontrados (amostra inicial)	Artigos selecionados (amostra final)
1	ACS SYNTHETIC BIOLOGY ISSN: 2161-5063	4	0
2	ACTA BIOTHEORETICA ISSN: 0001-5342	2	0
3	AGING CELL (PRINT) ISSN:1474-9718	6	0

4	AMERICAN JOURNAL OF HUMAN GENETICS ISSN: 0002-9297	1	0
5	BIOCHIMICA ET BIOPHYSICA ACTA. GENE REGULATORY MECHANISMS (PRINT) ISSN: 1874-9399	0	0
6	CELL HOST & MICROBE ISSN: 1931-3128	10	1
7	CELL METABOLISM ISSN: 1550-4131	0	0
8	CELLULAR & MOLECULAR IMMUNOLOGY ISSN: 1672-7681	1	1
9	CELLULAR AND MOLECULAR LIFE SCIENCES (ELECTRONIC ED.) ISSN: 1420-9071	0	0
10	CIÊNCIA E CULTURA (INTERDISCIPLINAR) ISSN: 2317-6660	0	0
11	GENOME BIOLOGY	12	1

	ISSN: 1474-760X		
12	GENOME RESEARCH ISSN: 1088-9051	0	0
13	HUMAN MOLECULAR GENETICS (PRINT) ISSN: 0964-6906	17	1
14	JOURNAL OF MOLECULAR BIOLOGY ISSN: 0022-2836	0	0
15	MOLECULAR CELL ISSN: 1097-2765	10	0

Quadro 5. Periódicos selecionados na área de Ciências Biológicas e Interdisciplinar.

No segundo momento, foi feita a busca por periódicos na área de física e ciências exatas, considerando-se os seguintes critérios de pesquisa: classificação de periódicos quadriênio 2017 a 2020, área de avaliação Interdisciplinar, Título em Física e classificação A1. A plataforma apresentou como resultado 2 periódicos nacionais em educação e ensino, ambos foram selecionados como base de dados. Os resultados da seleção de periódicos interdisciplinares em física, apresentado pelo Quadro 6, mostra de maneira respectiva o número de artigos encontrados (amostra inicial) de acordo com o tema de pesquisa e os artigos selecionados (amostra final) após leitura do resumo e da fundamentação teórica do trabalho, sendo analisados e incluídos na pesquisa. Apesar da restrita quantidade de periódicos selecionados, os artigos selecionados conseguiram satisfazer os critérios de pesquisa.

Número de Seleção	Periódicos/ revistas	Artigos encontrados (amostra inicial)	Artigos selecionados (amostra final)
1	CADERNO BRASILEIRO DE ENSINO DE FÍSICA ISSN: 2175-7941	0	0
2	REVISTA BRASILEIRA DE ENSINO DE FÍSICA ISSN: 0102-4744	5	2

Quadro 6. Periódicos selecionados na área de Física e Ciências.

Além da pesquisa em periódicos classificados como QUALIS A1, a busca por material bibliográfico na área de Física e Ciências Biológicas também foi realizada nos arquivos de Universidades Federais do Nordeste. A prioridade por trabalhos desenvolvidos no Nordeste justifica-se por ser a região do país com mais pesquisas publicadas na área de radiação ionizante e alterações no DNA humano. Os números de artigos selecionados de cada instituição podem ser observados no Quadro 7.

Instituição de Ensino	Repositório Acadêmico	Artigos encontrados (amostra inicial)	Artigos selecionados (amostra final)
Universidade Federal de Alagoas (UFAL)	Repositório UFAL	10	1
Universidade Federal da Bahia (UFBA)	Repositório Institucional UFBA	251	0

Universidade Federal do Ceará (UFC)	Repositório Institucional UFC	14	1
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)	Repositório Institucional UFMA	1	0
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)	Repositório Institucional UFPB	181	0
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)	Repositório ATTENA	386	5
Universidade Federal do Piauí (UFPI)	Repositório Institucional UFPI	31	0
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)	Repositório Institucional UFRN	350	3
Universidade Federal de Sergipe (UFS)	Repositório Institucional UFS	72	1

Quadro 7. Pesquisas selecionadas de Universidades Federais do Nordeste.

Ao todo, foram selecionados 12 artigos nos repositórios institucionais das Universidades Federais do nordeste brasileiro, mediante leitura do resumo e, encaixando-se na proposta de pesquisa, leitura da íntegra. Como critérios de busca foram utilizadas as palavras-chave descritas no Quadro 5 em cada base de dados.

6.2 FLUXOGRAMA DOS ARTIGOS SELECIONADOS

Após criteriosa seleção dos trabalhos foi desenvolvido um fluxograma apresentando o número de pesquisas incluídas, representadas por n. Ao todo foram incluídos 18 pesquisas, dentre elas, 5 pesquisas na área de Ciências biológicas e

interdisciplinar com viés na área de Física, 2 pesquisas na área de Física e Ciências e 11 pesquisas desenvolvidas por discentes e docentes de Universidades Federais do nordeste na área de Ciências Biológicas e Física.

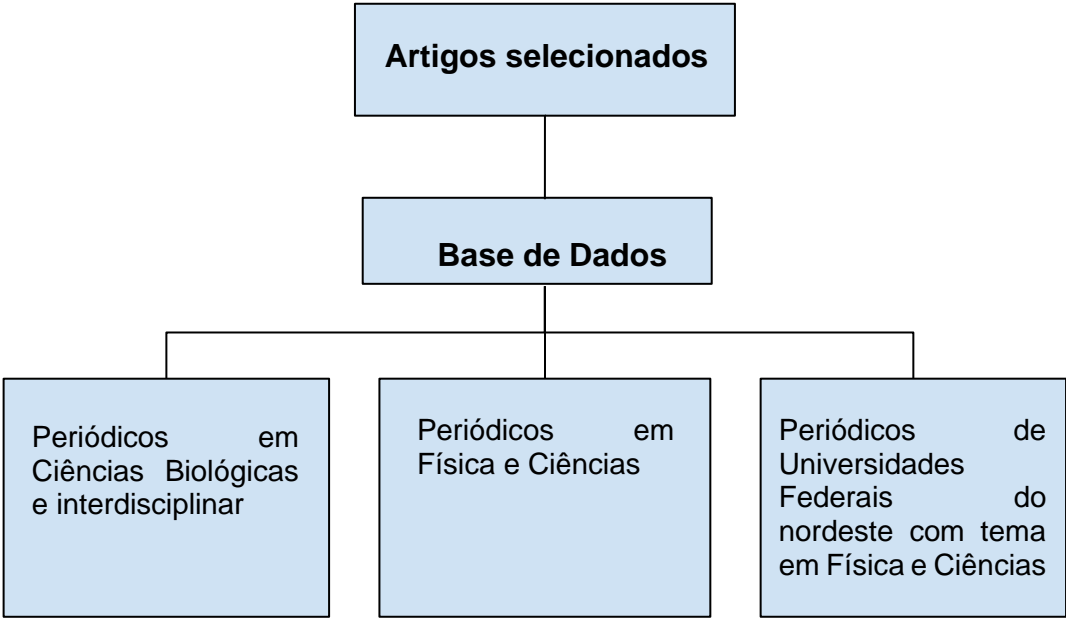


Figura 12. Fluxograma dos artigos selecionados.

6.3 ANÁLISE DAS PRINCIPAIS INFORMAÇÕES INCLUIDAS NA PESQUISA

Autores/ Ano de publicação	Título do artigo	Tipo de estudo	Objetivo geral	Principais resultados
Rodrigues et al. (2024)	Efeito da radiação ultravioleta na expressão da proteína Hsp70 em células HaCaT.	Pesquisa de campo.	Determinar o efeito da radiação UVA, UVB e UVC sobre células epiteliais HaCaT, por meio da análise da expressão da	-A radiação UV gera estresse celular nas células HaCaT, avaliadas pelo bioindicador de estresse Hsp70. -De acordo com

			Hsp70.	o comprimento de onda da radiação UV, aquelas que têm um comprimento de onda menor têm um maior potencial de dano celular.
Medeiros <i>et al.</i> (2015)	Análise do conhecimento sobre radiações ionizantes e qualidade do equipamento de proteção individual em um hospital público.	Pesquisa de campo, qualitativa, exploratória.	Avaliar o conhecimento sobre radiação ionizante dos trabalhadores das técnicas radiológicas em um hospital público.	-Os achados sugerem que treinamentos sistemáticos poderiam ajudar no esclarecimento e promover a saúde do trabalhador, reduzindo o desenvolvimento de lesões celulares por excesso de exposição à radiação ionizante.
Conceição <i>et al.</i> (2017)	Fatores intervenientes na proteção	Estudo observacional, exploratório,	Identificar fatores intervenientes,	-Foram observados os fatores de

	radiológica ocupacional no controle de qualidade em câmaras gama.	descritivo.	bem como, dispositivos de proteção radiológica disponíveis em um serviço de medicina nuclear (MN), envolvidos nos testes de Controle de Qualidade em Câmaras Gama (CQCG).	proteção radiológica, entre eles: tempo, distância e blindagem contra radiação. Tais fatores, quando relacionados entre si, contribuem para o desenvolvimento de lesões celulares (estresse oxidativo, danos ao DNA e interferência no processo de reparo) e teciduais (danos na pele ou em órgãos internos).
Souza <i>et al.</i> (2020)	Análise dos Efeitos da Radiação Infravermelha Local em Voluntários	Pesquisa de campo, exploratória, descritiva.	Verificar a influência da radiação infravermelha (RIV) no processo	-Os resultados indicam que a RIV é capaz de elevar a LLD, sugerindo interferências

	Hígidos Submetidos a Desconforto Álgico Agudo Induzido por Hipotermia.		álgico agudo induzido pela hipotermia por meio da aferição da latência do limiar do desconforto (LLD) e da intensidade do desconforto (ID).	nos mecanismos centrais de inibição da dor.
--	--	--	---	---

Quadro 8. Periódicos em Ciências Biológicas e interdisciplinares. Fonte: Autoria Própria.

Autores/ Ano de publicação	Título do artigo	Tipo de estudo	Objetivo geral	Principais resultados
Rodrigues, F.G.F; Brizola, A. (2019)	Radiação de baixa frequência é possível influência nociva a sistemas biológicos.	Estudo teórico.	Pesquisar a influência de radiações de baixa frequência, e os possíveis danos associados a doenças que esse tipo de radiação pode causar.	<p>- A radiação utilizada por aparelhos com baixa frequência de radiação, é considerada como não prejudicial aos seres vivos, não resultando em danos à saúde das pessoas;</p> <p>- Além de efeitos</p>

				térmicos, existe uma relação entre o potencial de ação da radiação ionizante sobre sistemas biológicos e o aumento do estresse oxidativo no meio celular.
Paiva, Eduardo de (2014)	Princípios do cálculo de blindagem em radioterapia.	Estudo Teórico.	Utilizar a lei do inverso do quadrado da distância e a lei de atenuação exponencial da intensidade da radiação para obter uma expressão básica necessária para se estimar as espessuras das barreiras primárias em radioterapia.	É mostrado que a espessura da barreira depende de parâmetros do equipamento; dos tipos de tratamento; da quantidade de pacientes tratados por dia; do tipo de ocupação da área que deve ser protegida; da distância da fonte; da energia do feixe de fótons; da natureza do material escolhido para construir a barreira, e do nível de radiação

				permitido no ponto de interesse.
--	--	--	--	--

Quadro 9. Periódicos em Física e Ciências. Fonte: Autoria Própria.

Autores/ Ano de publicação	Título do artigo	Tipo de estudo	Objetivo geral	Principais resultados
Mendes, M. E. (2019)	Aplicação de técnicas citogenéticas em cenários complexos a exposição da radiação ionizante. (UFPE)	Trabalho teórico.	Analisar o efeito biológico da baixa radiação LET por ensaios citogenéticos para aplicarem cenários complexos de exposição à radiação ionizante.	-Os achados reafirmam a necessidade de determinar a taxa de dose envolvidas no cenário de exposição, pois esse fator é de suma importância para a correta estimativa de dose, além da taxa de dose interferir nos resultados de comparações laboratoriais.
Braga, L.R.P. (2006)	Aplicação da citogenética na avaliação da radioproteção	Pesquisa de campo.	Analisar as frequências de micronúcleos de indivíduos	-A frequência de aberrações cromossômicas instáveis dos

	de traumatologist as do Recife. (UFPE)		expostos e não expostos a radiação ionizante.	indivíduos estudados (expostos a radiação ionizante) eram maiores que a dos indivíduos não expostos. -As consequências da exposição manifestam-se a nível celular e tecidual; atingindo diretamente a atividade do DNA.
Marques, A.T. (2020)	Avaliação dos efeitos da radiação gama em quatro variedades de mamona. (UFPE)	Pesquisa de campo experimental.	Avaliar a influência da radiação gama em quatro variedades de mamona e suas consequências genéticas (alterações no DNA).	-A radiação interferiu no desenvolvimen to das plantas, advindas de alterações genéticas.
Mendes, A.E.	Verificação da	Pesquisa de	Verificar as	-As alterações

(2014)	taxa de alterações cromossômicas em sangue humano irradiado em feixe gama. (UFPE)	campo.	frequências das alterações cromossômicas instáveis em linfócitos do sangue humano irradiado em feixe gama com diferentes doses absorvidas e, posteriormente, estabelecer diferentes curvas de calibração dose-resposta.	cromossômicas instáveis (dicêntricos, anéis e fragmentos) esperadas foram observadas e as frequências de tais alterações aumentaram com a dose absorvida.
Melo, W.V.C. (2016)	Efeitos da irradiação de corpo inteiro sobre as proteínas contráteis do músculo esquelético de ratos precocemente desnutridos. (UFPE)	Pesquisa de campo, amostra animal	Avaliar os efeitos a longo prazo da radiação ionizante sobre as proteínas contráteis (actina e miosina) de dois diferentes músculos esqueléticos, Sóleo e Extensor	-A exposição a radiação e a desnutrição (enfraquecimento do organismo), conjuntamente, provocaram perda de massa corporal. -A exposição a radiação levou à uma redução

			Longo dos Dedos (EDL), em ratos submetidos à desnutrição precoce.	na concentração das proteínas séricas.
Chaves, L.C.C. (2014)	Influência da radiação ionizante natural no Açu do Boqueirão (RN): avaliação de risco saúde/ambiente e (UFRN)	Pesquisa de campo.	Analisar as possíveis influências da radiação para a saúde humana e para o meio ambiente.	-As consequências provocadas pela exposição à radiação natural podem causar sérios problemas de saúde, inclusive alterações do meio ambiente.
Oliveira, R.G. (2019)	Efeitos da radiação ionizante natural na metilação global do genoma da população de Lajes Pintadas (RN). (UFRN)	Pesquisa de campo, experimental.	Avaliar as alterações epigenéticas causadas pela elevada radiação ionizante natural nos moradores de Lajes Pintadas/RN.	-Constatou-se que os problemas de saúde causados pela exposição em excesso a radiação ionizante natural também são desenvolvidos por questões

				de epigenética (hereditariedade) e hábitos de vida, como ambiente de trabalho e lazer.
Paiva, R.R.N (2024)	Polimorfismo genético como instrumento de biomonitoramento de suscetibilidade à radiação natural. (UFRN)	Revisão de literatura.	Analisar a literatura sobre os genes GSTT1/GSTM1 e os efeitos da exposição crônica a partículas alfa pela inalação de radônio, utilizando o polimorfismo genético como instrumento de monitoramento de suscetibilidade.	-Identificou-se pesquisas envolvendo os genes citados e a descrição da frequência fenotípica de grupos populacionais da região, estabelecendo, portanto, um conjunto de informações necessárias para avaliar a suscetibilidade dos indivíduos testados em relação ao processo carcinogênico.
Xavier, M.N. (2018)	Avaliação de danos radioinduzidos	Pesquisa de campo.	Buscou-se avaliar o potencial de	-Mesmo para baixas concentrações

	devido à exposição aos radionuclídeos ^{238}U , ^{232}Th e ^{40}K através de sistemas bioindicadores . (UFS)		baixas concentrações de radionuclídeos e se estas promoverem mutações radioinduzidas.	, a exposição frequente aos radionuclídeos pode desencadear danos locais, cujo potencial carcinogênico pode estar associado principalmente a alta LET dos emissores de radiação alfa.
Silva, J.A.; Marques, R.R.L.B; Souto, V.G.L. (2021)	Radiação e Luz (UFAL)	Pesquisa de revisão.	Abordar os principais conceitos referentes a radiação e luz.	A exposição constante à luz solar pode causar sérias lesões cutâneas, podendo agravar para o câncer de pele.
Gondim, B.A.M (2016)	Interação da radiação ionizante com a matéria e seus efeitos no corpo humano. (UFCE)	Pesquisa de revisão.	Analisar como cada tipo de radiação ionizante interage com a matéria e como essas interações afetam nosso	Com o excesso de exposição à radiação ionizante, moléculas importantes do corpo humano (como o DNA)

			corpo.	são danificadas e podem resultar no comprometimento das funções fisiológicas, causando, assim, diversos efeitos no corpo humano.
--	--	--	--------	--

Quadro 10. Periódicos selecionados de Universidades Federais do nordeste.

Fonte: Autoria Própria.

Em todos os artigos analisados, os malefícios advindos da excessiva exposição à radiação ionizante são evidentes, principalmente tratando-se de dano celular e mutação genética. O DNA é alterado de diversas formas após a exposição, desde maneiras mais simples como a desnaturação, até mutações genéticas que resultam em graves lesões nos tecidos ou consequências hereditárias. Todavia, o grau das lesões e consequências variam mediante diversos fatores, como dose da radiação, tempo de exposição, condição fisiológica do indivíduo que recebe as partículas ou ondas e fatores ambientais, que podem ser agravantes ou não.

Desta forma, as pesquisas analisadas foram destrinchadas em aspectos indispensáveis para a discussão, dentre eles os efeitos da radiação no DNA, consequências genéticas e medidas de prevenção e radioproteção; visto que estes são os quesitos principais deste trabalho de revisão integrativa.

7 DISCUSSÃO

Como foi visto, a radiação é a energia propagada na conformação de ondas eletromagnéticas ou partículas, ela subdivide-se em não-ionizante e ionizante. A radiação ionizante (RI) é a energia que se propaga através do espaço com capacidade de remover elétrons dos átomos, produzindo íons. Desta forma, temos que os elementos radioativos são substâncias que emitem radiação ionizante em um esforço de alcançar a estabilidade nuclear, tem origem natural ou artificial, e podem ter efeitos prejudiciais à saúde a depender da dose absorvida e do tempo de exposição. Esses danos podem influenciar diversos processos biológicos, pois podem evoluir com a dose de radiação absorvida pelo corpo e provocar sérias lesões celulares e teciduais (Silva; Marques; Souto, 2021)

É perceptível que cada grau de radiação interage com a matéria de forma distinta dependendo da energia e da composição molecular do material irradiado. Para Gondim (2016) e Xavier (2018), o primeiro fenômeno que acontece ao incidirmos RI em uma molécula orgânica é a ionização e excitação dos átomos que a constituem. Esse processo pode levar a um efeito constante causando mais radiação (radiação secundária) até esta quantidade ser insuficiente para expulsar elétrons de seus níveis mais externos, ou seja, da sua camada de valência. A partir desse processo, ocorre o enfraquecimento celular, pois as suas moléculas entram em estado de instabilidade, rompendo ligações químicas e impedindo o seu equilíbrio biológico.

Desta forma, a fração de energia radioativa absorvida pelas células do corpo tem a habilidade de relacionar-se com seus átomos e moléculas gerando alterações no material genético. Mendes (2019) discorre que essas alterações geram espécies químicas reativas capazes de oxidar proteínas, lipídios e ácidos nucleicos, afetando as bases nitrogenadas; nessas condições, o DNA é comprometido ao ponto de impedir a transcrição e a tradução. Ademais, a RI é capaz de acarretar diversas alterações diretamente nos ácidos nucleicos, como a quebra das pontes de hidrogênio que unem as bases nitrogenadas, ocorrendo o rompimento da dupla fita de DNA, que, a depender do grau da interação, impossibilita o reparo.

Por meio dos estudos de Melo (2016) e Chaves (2014), os resultados mostram que a exposição a elevadas doses culminam em alterações bioquímicas e severas consequências para o organismo, as quais induzem sinalizações moleculares a fim de reparar esses danos, caso o reparo não seja obtido os danos podem resultar em

alterações fisiológicas permanentes como mutação. Assim, mediante os danos genéticos, poderá ocorrer a morte celular (apoptose) que pode ser prejudicial à saúde quando ocorre em excesso ou de forma inadequada, levando ao desenvolvimento de doenças e até mesmo ao câncer. A apoptose também pode ser prejudicial em situações em que a célula é morta de forma descontrolada, como na necrose, causando inflamação e sérios danos teciduais. Estes danos mais severos estão relacionados a altas LET e elevados períodos de exposição.

A taxa de dose absorvida é um fator a ser considerado na análise das alterações citológicas instáveis, uma vez que o tempo prolongado de exposição à radiação reduz o número de alterações produzidas pela radiação de baixa LET, pois aumenta as alterações biológicas de alta LET. Esse período prolongado possibilita que os mecanismos de reparo celular funcionem normalmente. Se o indivíduo for exposto à radiação ionizante de alta LET por longo período, as organelas celulares serão afetadas e os mecanismos de reparo celular não poderão atuar. Assim, por intervenção das pesquisas de Marques (2020), Oliveira (2019) e Xavier (2018), as alterações citológicas sofrem influências do valor total da dose absorvida, da taxa de dose absorvida, da linhagem celular irradiada (células maduras e imaturas) e parâmetros biológicos, todos estes influenciam na LET recebida pelo organismo.

Portanto, as alterações no DNA, quando atingem um número considerado de células, são capazes de comprometer tecidos, órgãos e até os processos fisiológicos normais de um indivíduo exposto. Para Mendes (2014), os efeitos desse tipo de reação são diversos, entre eles destacam-se os efeitos hereditários e os teciduais. Nos efeitos hereditários, a mutação está nas células germinativas (óvulos e espermatozoides); se tais células forem usadas na concepção, o feto carregará danos hereditários e não resultará em novas “mutações”, apenas as originárias da radiação. Nos efeitos teciduais, o indivíduo entrou em contato com uma dose muito alta de radiação durante pouco tempo ou por períodos de tempo próximos. Por isso, o dano no DNA e a morte celular ocorrem em vários tecidos do corpo humano ao mesmo tempo. Essa falha geral ocasiona uma resposta do corpo humano, gerando diversos sintomas que variam de enjoo e vômitos até lesões em órgãos vitais.

É interessante compreender que os efeitos da radiação nem sempre estão dispostos em uma região alvo do organismo. De acordo com os estudos de Paiva (2024) e Sousa *et al.* (2020), os efeitos radioativos estocásticos, ao acaso, ocorrem naturalmente nas células fisiologicamente normais e, diferentemente das reações

teciduais que necessitam de uma dose alta de radiação para ocorrer, podem ser causados por qualquer quantidade de dose (alta ou baixa). Desta forma, o DNA pode sofrer alterações com alta dose em um curto tempo ou baixa dose por elevado tempo, assim, a quantidade da dose de RI e o tempo de exposição são grandezas inversamente proporcionais.

Deste modo, perante as pesquisas sobre RI e seus malefícios, torna-se necessário discorrer acerca das atitudes preventivas. Conforme Braga (2006) e Rodrigues; Brisola (2019), medidas precaucionais e radioproteção são de extrema importância para evitar acidentes e reduzir riscos de exposição, principalmente nos ambientes profissionais, laboratoriais e industriais. A Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) sistematiza recomendações sobre radioproteção com a finalidade primordial de fornecer ao homem um padrão adequado de segurança contra os efeitos prejudiciais das RI, sem impedir as atividades humanas benéficas à sociedade ou ao indivíduo do uso destas energias.

Dentre as recomendações da ICRP estão o limite de dose em exposição ocupacional, incluindo a classe dos trabalhadores, espaços de lazer e ambientes domésticos, visando a proteção à saúde e ao meio ambiente. A comissão também busca reduzir a exposição humana à radiação que conseqüentemente causa graves lesões no organismo, incluindo o material genético, por meio de treinamento e educação radiológica. Os trabalhos de Conceição et al.(2017), Medeiros et al.(2017) e Rodrigues et al.(2024) enfatizam a importância do acesso à informação como ferramenta essencial para auxiliar na adoção de medidas que reduzam os riscos à exposição excessiva e prevenir acidentes radioativos, causados por fontes naturais ou artificiais. Dessa forma, novos métodos podem favorecer uma maior segurança e efetividade a saúde física, concorrendo para um desempenho mais apropriado de prevenção de danos celulares e genéticos.

Com os resultados apresentados nas pesquisas, torna-se necessário pontuar determinados aspectos. Mediante a análise dos artigos, nota-se que as alterações químicas a nível molecular não foram devidamente investigadas. Assim, a análise revisional dessas modificações torna-se incompleta. Os trabalhos publicados pelas universidades federais do nordeste tiveram como resultado final a verificação dos processos fisiológicos da célula, investigando suas características gerais após a exposição. O não detalhamento implica em resultados já esperados, não explicitando como as alterações moleculares ocorrem ou quais as sinalizações moleculares que

ocorrem no interior das células nos processos de reparo, por exemplo. O mesmo ocorre com as pesquisas disponíveis nos periódicos de ciências biológicas, eles não contemplam o assunto de forma minuciosa. Desta forma, há a ideia de que as conclusões são pleonásticas.

Em relação aos trabalhos na área de física e ciências multidisciplinares, há o detalhamento dos processos físicos que ocorrem a nível atômico após a exposição a RI, as alterações nucleares são muito citadas e pormenorizadas, até em estudos mais antigos. Todavia, as alterações moleculares também não foram investigadas, influenciando a restrição da análise. Inclusive, estes trabalhos priorizam discorrer a respeito de dose de radiação, tempo de exposição e radioproteção, não priorizando as alterações bioquímicas, genéticas e moleculares.

Durante a pesquisa em revistas com classificação CAPES A1 e periódicos de universidades federais do nordeste brasileiro, notou-se uma baixa quantidade de publicações na área de radiação e alterações no DNA. As pesquisas que não foram contempladas neste trabalho não tratavam de efeitos citológicos, genéticos ou fisiológicos da radiação, mas sim de radiação e complicações ambientais. Visto isso, os estudos em RI ainda estão escassos, em um período de 25 anos, impedindo uma análise mais ampla dos processos celulares decorrentes de lesões e alterações químicas causadas por radiação. Por tratar-se de um tema de grande importância para a área da saúde e para a pesquisa científica, esperava-se uma maior quantidade de publicações, afinal, os periódicos investigados faziam parte da maior classificação QUALIS, ou seja, tem grande impacto científico, do mesmo modo os periódicos de Universidades Federais. Desta forma, torna-se necessária a ampliação de pesquisas na área, a fim de detalhar os conhecimentos já existentes e solucionar diversas questões não respondidas, dentre elas: quais as alterações moleculares que ocorrem nas células expostas a altas doses de radiação ionizante por longos períodos?

8 CONCLUSÃO

Com o levantamento bibliográfico, concluiu-se que o primeiro fenômeno que acontece ao incidir radiação ionizante em um material é a excitação dos átomos que constituem a matéria, posteriormente ocorre a ionização. Com o avanço dos estudos na área, notou-se que os principais motivos que englobam as consequências fisiológicas da radiação estão ligados à molécula de DNA. Esta, ao ser afetada, pode ocasionar alterações bioquímicas, rompimento da dupla fita, morte celular ou mutações genéticas que podem levar a efeitos teciduais ou estocásticos, além de serem reversíveis ou não a depender da dose de radiação absorvida, tempo de exposição, quantidade da LET e RBE, além de condições fisiológicas.

As pesquisas analisadas constataram que, devido aos prejuízos causados a exposição excessiva à radiação, recomenda-se o limite de dose ocupacional de 20 mSv por ano, com a restrição de que a dose absorvida não pode exceder os 50 mSv em um único ano, pois, doses elevadas podem causar alterações no material genético. Embora haja uma escassa quantidade de trabalhos que abordam o tema, as pesquisas evidenciam a importância da informação em radioproteção como medida essencial para prevenir acidentes e minimizar situações de risco.

Apesar dos resultados obtidos, verificou-se uma insuficiência de pesquisas na área. Em 25 anos de trabalhos científicos, os estudos não apresentam amplas informações sobre como a radiação interage com as células do organismo humano. Os artigos selecionados apresentaram informações semelhantes quanto às alterações causadas pela radiação no DNA, não aprofundando o tema para alterações químicas e moleculares. As pesquisas das universidades federais do Nordeste, em sua maioria, pertenciam a área de ciências biológicas/biologia/interdisciplinar, apresentando resultados bem desenvolvidos na parte física, mas careciam de mais informações na parte biológica. Além disso, as pesquisas também se apresentaram escassas nos periódicos com classificação QUALIS A1, remetendo a ideia de que as revistas com maior visibilidade não desenvolveram muitos trabalhos nessa temática durante este século. Desta forma, torna-se necessário ampliar as pesquisas com o tema radiação ionizante, tanto na área de física como de ciências biológicas, a fim de contribuir com novas informações para a área da saúde e pesquisa científica.

REFERÊNCIAS

- ABUBAKAR, Abubakar Mohammed, et al. Knowledge management, decision-making style and organizational performance. *Journal Of Innovation & Knowledge*, [S.L.], v. 4, n. 2, p. 104-114, abr. 2019.
- ARDENGHI, T. M.; BAYARDO, R. B.; OLIVEIRA, J. X. Estimativa de Risco Biológico das Radiações Ionizantes na Medula Óssea, Glândula Tireóide e Glândulas Salivares: Considerações sobre Pacientes Infantis. *Jornal Brasileiro de Odontopediatria e Odontologia do Bebê*, v. 6, n. 32, p. 339-43, 2003.
- ATTIX, Frank Herbert; *Introduction To Radiological Physics And Radiation Dosimetry* - WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Cap 1 pag. 2 , 2004.
- AZZAM, Eduardo; JAY-GERIN, Jean-Paul; PAIN, Debkumar. Ionizing radiation-induced metabolic oxidative stress and prolonged cell injury. *Cancer letters*, v. 327, n. 1-2, p. 48-60, 2012.
- BAKER, John; MOULDER, John; HOPEWELL, John. Radiation as a risk factor for cardiovascular disease. *Antioxid Redox Signal*, v. 15, n. 7, p. 1945-56, Oct 1 2011.
- BAKER-JARVIS, James; KIM, Sung. The interaction of radio-frequency fields with dielectric materials at macroscopic to mesoscopic scales. *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, v. 117, p. 1, 2012.
- BELLONI, Jaqueline et al. *Radiation chemistry from basics to applications in material and life sciences*. 2008.
- Boice, John et al. *Uma metodologia abrangente de reconstrução de dose para extrabalhadores internacionais de radiação da rocketdyne/atomics*, 2006.
- BRAGA, Lidiane Régia Pereira. *Aplicação da citogenética na avaliação da radioproteção de traumatologistas do Recife*, 2006.
- BRÜCKMANN, Magale Elisa; FRIES, Susana Gomes; - *Radioatividade - Instituto de Física - Porto Alegre - UFRGS*, (Textos de Apoio ao Professor de Física; n. 2). 39p. 1991.
- BUDWORTH, Helen et al. DNA repair and cell cycle biomarkers of radiation exposure and inflammation stress in human blood. *PloS one*, v. 7, n. 11, p. e48619, 2012.
- BURIGO, Lucas et al. Distributions of deposited energy and ionization clusters around on tracks studied with Geant4 toolkit. *Physics in Medicine & Biology*, v. 61, n. 10, p. 3698, 2016.
- BUSHONG, Stephen. *Ciência radiológica para tecnólogos: física, biologia e proteção*. [tradução Sandro Martins Dolghi et al.]. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.
- CHAVES, L.C.C. *Influência da radiação ionizante natural no Açude do Boqueirão*

(RN): avaliação de risco saúde/ambiente, 2014.

CHRISTENSEN, Doran; IDDINS, Carol; SUGARMAN Sthefen. Ionizins Radiation Injuries and Illnesses. *Emerg Med Clin N Am*, 32:245–265, 2014.

CONCEIÇÃO, Matheus da Silva Ventura da et al. Fatores intervenientes na proteção radiológica ocupacional no controle de qualidade em câmaras gama, 2017.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Publications about Radon. United States of America, Disponível em: < <https://www.epa.gov/radon/publications-about-radon> >. Acesso em: Maio 2016.

FEYNMAN, Richard. Lições de Física. Volume I-Mecânica, Radiação e Calor, 2008.

FLÔR, Rita de Cássia; KIRCHHOF, Ana Lúcia Cardoso. Uma prática educativa de sensibilização quanto à exposição à radiação ionizante com profissionais de saúde. *Revista Brasileira de Enfermagem*, v. 59, n. 3 p. 274-278, 2006.

FQ.PT. Comparação α, β e γ . Disponível em: <https://www.fq.pt/radioatividade/comparacao-alfa-beta-e-gama>

GARCIA-SAGREDO, J. M. Fifty years of cytogenetics: a parallel view of the evolution of cytogenetics and genotoxicology. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Gene Regulatory Mechanisms*, v. 1779, n. 6-7, p. 363-375, 2008.

GONDIM, Bianca Azulay Martins. Interação da radiação ionizante com a matéria e seus efeitos no corpo humano, 2016.

HALL, Janet et al. Ionizing radiation biomarkers in epidemiological studies—anupdate. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, v. 771, p. 59-84, 2017.

HAMZA, Zareena. et al. A simple method to irradiate blood cells in vitro with radon gas. *Radiat Prot Dosimetry*, v. 130, n. 3, p. 343-50, 2008

HIRSHFELD, John et al. Clinical Competence Statement on Physician Knowledge to Optimize Patient Safety and Image quality in fluoroscopically guided Invasive Cardiovascular Procedures. *Journal of the American College of Cardiology*. v. 44, n. 11, 2004.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). *The radiological accident in Goiânia* Vienna, 1988.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA) – Mutation Breeding Review – Officially Released Mutant Varieties in China – nº. 14, April 2004.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA. Cytogenetic dosimetry: applications in preparedness for and response to radiation emergencies. *EPR-Biodosimetry*, 2011.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP). General principles for the Radiation Protection of Workers. ICRP. Report 75, Elmsford, NY. Pergamon Press, ICRP Publication, 1997.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP). Recommendation of the International Commission on Radiological Protection. ICRP. Report 60, Elmsford, NY: Pergamon Press, ICRP Publication, 1990.

KAWATA, Tetsuya et al. Chromosome aberrations induced by high-LET radiations. Biological Sciences in Space, v. 18, n. 4, p. 216-223, 2004.

KNOLL, Glenn.; Radiation Detection and Measurement. Third Edition, 1999.

LAGERWERF, Saskia. et al. DNA damage response and transcription. DNA repair, v. 10, n. 7, p. 743-750, 2011.

L'ANNUNZIATA, Michael. Radioactivity - Introduction and History, From the Quantum to Quarks. Second Edition. Elsevier, 2016.

LARA, Pedro Carlos et al. Direct and by tander radiation effects: A biophysical model and clinical perspectives Cancer Letters. Mini-review, 2013.

LENG, Shuguang. et al. Genetic variation in SIRT1 affects susceptibility of lung squamous cell carcinomas in former uranium miners from the Colorado plateau. Carcinogenesis, v. 34, n. 5, p. 1044-50, May 2013.

LITTLE, Mark et al. Risks associated with low doses and low dose rate of ionizing radiation: why linearity may be (almost) the best we can do. Radiology, v. 251, n. 1, p. 6-12, 2010.

LOUCAS, Bradford et al. Chromosome Damage in Human Cells by y Rays, a Particles and Heavy Ions: Track Interactions in Basic Dose-Response Relationships. Radiation Research, 2013.

MARQUES, Ariosto Teles. Avaliação dos efeitos da radiação gama em quatro variedades de mamona, 2020.

NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS (NCRP) Reports. Estados Unidos da América, 2017. Disponível em: < <https://www.ncrppublications.org/reports/> >.

MEDEIROS, Caroline de, et al. Análise do conhecimento sobre radiações ionizantes e qualidade do equipamento de proteção individual em um hospital público, 2015.

MELO, Wilson Viana de Castro. Efeitos da irradiação de corpo inteiro sobre as proteínas contráteis do músculo esquelético de ratos precocemente desnutridos, 2016.

MENDES, Mariana Esposito. Aplicação de técnicas citogenéticas em cenários complexos a exposição da radiação ionizante, 2019.

MENDES, Mariana Esposito. Verificação da taxa de alterações cromossômicas em sangue humano irradiado em feixe gama, 2014.

MIGUEL NETA. Poder de penetração das radiações, 2023. Disponível em: <https://www.fq.pt/radioatividade/comparacao-alfa-beta-e-gama>

MSD, Manuals. Estrutura do DNA, 2023. Disponível em: <https://www.msmanuals.com/pt/profissional/multimedia/image/estrutura-do-dna>

NUCLEAR, CNDE. Informações básicas sobre energia nuclear e radiações. 2005. 50. Disponível em: < <http://www.cnen.gov.br/component/content/article?id=167>>.

OLIVEIRA, Rebeka Guerra de. Efeitos da radiação ionizante natural na metilação global do genoma da população de Lajes Pintadas (RN), 2019.

PAIVA, Eduardo de. Princípios do cálculo de blindagem em radioterapia, 2014.

PAIVA, Ruan Ramires. Polimorfismo genético como instrumento de biomonitoramento de suscetibilidade à radiação natural, 2024.

ROBERTSON, Aaron et al. The Cellular and Molecular Carcinogenic Effects of Radon Exposure: A Review. International Journal Of Molecular Sciences, [s.l.], v. 14, n. 7, p.14024-14063, 5 jul. 2013. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ijms140714024>.

RODRIGUES, Sérgio Hugo et al., Efeito da radiação ultravioleta na expressão da proteína Hsp70 em células HaCaT, 2024.

RODRIGUES, F.G.F; Brizola, A. Radiação de baixa frequência é possível influência nociva a sistemas biológicos, 2019.

ROTHKAMM, K. et al. Comparison of established and emerging biodosimetry assays. Radiation research, v. 180, n. 2, p. 111-119, 2002.

SCHEID, Neusa Maria John; DELIZOICOV, Demétrio; FERRARI, Nadir. A proposição do modelo de DNA: um exemplo de como a História da Ciência pode contribuir para o ensino de genética. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 4, 2003, Bauru. Atas... Bauru: Associação Brasileira de Pesquisadores em Educação em Ciências, 2003. 1 CD-ROM.

SILVA, J.A.; MARQUES, R.R.L.B; SOUTO, V.G.L. Radiação e luz, 2021.

SOUZA, Ana Isabella Sobral Oliveira et al. Análise dos Efeitos da Radiação Infravermelha Local em Voluntários Hígidos Submetidos a Desconforto Álgico Agudo Induzido por Hipotermia, 2020.

SOUSA, Luís Manuel Mota de Sousa et al. Metodologia de Revisão Integrativa da Literatura em Enfermagem, 2017.

TAUHATA, Luiz. et al. Radioproteção e dosimetria: fundamentos. Instituto de radioproteção e dosimetria, comissão nacional de energia nuclear. Rio de Janeiro, 2013.

TIPLER, P.A.; Mosca, G., Física para Cientistas e Engenheiros -Volume 3 (6a edição), 2016.

VELUDO, Patrícia Carvalho. Efeitos da radiação X e níveis de exposição em exames imagiológicos: inquéritos a clínicos gerais. 2011. 65 f. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) - Curso de Faculdade de Medicina da Universidade de Coimbra, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2011.

VOISIN, Philippe; ROY, Laurence; BENDERITTER, Marc. Why can't we find a better biological indicator of dose? Radiation Protection Dosimetry, v. 112, n. 4, p. 465-469, 2004.

WALKER, H.R., Fundamentos de Física. Volume 4, 1993.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION (WNA). Nuclear Radiation and Health Effects. July 2016. Disponível em: <http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-andsecurity/radiation-and-health/nuclear-radiation-and-health-effects.aspx> >.

XAVIER, Magno Nogueira. Avaliação de danos radioinduzidos devido à exposição aos radionuclídeos ^{238}U , ^{232}Th e ^{40}K através de sistemas bioindicadores, 2018.

YOSHIMURA, Elisabeth Mateus. (2009). Física das Radiações: interação da radiação com a matéria. Revista Brasileira De Física Médica, 3(1), 57–67. <https://doi.org/10.29384/rbfm.2009.v3.n1.p57-67>