



**EXPOSIÇÃO ÀS RADIAÇÕES IONIZANTES E NÃO IONIZANTES E O  
COMPROMETIMENTO DA FUNÇÃO REPRODUTIVA MASCULINA: UMA REVISÃO  
DE LITERATURA**

***EXPOSURE TO IONIZING AND NON-IONIZING RADIATIONS AND THE IMPAIRMENT  
OF MALE REPRODUCTIVE FUNCTION: A LITERATURE REVIEW***

***EXPOSICIÓN A LAS RADIACIONES IONIZANTES Y NO IONIZANTES Y EL  
COMPROMISO DE LA FUNCIÓN REPRODUCTIVA MASCULINA: UNA REVISIÓN DE  
LA LITERATURA***

Kariny Ramos da Silva<sup>1</sup>, Glohane Kelly Vieira Quadros<sup>1</sup>, Beatriz Silva de Oliveira Meireles<sup>1</sup>, Yamile Vitoria Nascimento de Sousa<sup>1</sup>, Francijara Araujo Da Silva<sup>2</sup>

e768280

<https://doi.org/10.47820/recima21.v7i6.8280>

PUBLICADO: 06/2026

**RESUMO**

A crescente exposição humana às radiações ionizantes e não ionizantes, impulsionada pelo avanço tecnológico e pela ampliação do uso de dispositivos eletrônicos e procedimentos médicos radiológicos, tem despertado preocupações acerca dos possíveis impactos sobre a saúde reprodutiva masculina. O presente estudo teve como objetivo analisar os efeitos da radiação ionizante e não ionizante sobre a função reprodutiva masculina, com base na literatura científica recente. Trata-se de uma revisão integrativa de literatura, realizada nas bases PubMed, LILACS, Biblioteca Virtual em Saúde (BVS) e SciELO, utilizando descritores relacionados à radiação ionizante, radiação não ionizante, infertilidade masculina, espermatogênese e função reprodutiva masculina. Foram incluídos estudos publicados entre 2020 e 2026, disponíveis na íntegra, nos idiomas português, inglês e espanhol, sendo excluídos trabalhos duplicados, estudos incompletos e publicações não pertinentes à temática. Inicialmente, foram identificados 647 estudos; após triagem, remoção de duplicidades e análise de elegibilidade, 20 artigos compuseram a amostra final. Os resultados demonstraram que tanto a radiação ionizante quanto a não ionizante podem provocar alterações na função reprodutiva masculina, incluindo redução da motilidade, vitalidade e concentração espermática, danos ao DNA dos espermatozoides, alterações hormonais, estresse oxidativo, apoptose celular e comprometimento da espermatogênese. Observou-se ainda que fatores como intensidade, duração e exposição ocupacional influenciam a magnitude dos danos reprodutivos. Conclui-se que a exposição às radiações representa potencial fator de risco à fertilidade masculina, reforçando a necessidade de medidas preventivas, radioproteção e aprofundamento das investigações científicas sobre seus efeitos biológicos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fertilidade masculina. Radiação ionizante. Radiação não ionizante.

**ABSTRACT**

*The increasing human exposure to ionizing and non-ionizing radiation, driven by technological advancements and the expanding use of electronic devices and radiological medical procedures, has raised concerns regarding its potential impacts on male reproductive health.*

<sup>1</sup> Centro Universitário Fametro, Graduanda de Biomedicina.

<sup>2</sup> Centro Universitário Fametro, Doutora em Genética, Conservação e Biologia Evolutiva pelo Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia.



*This study aimed to analyze the effects of ionizing and non-ionizing radiation on male reproductive function based on recent scientific literature. An integrative literature review was conducted using the PubMed, LILACS, Virtual Health Library (VHL), and SciELO databases, employing descriptors related to ionizing radiation, non-ionizing radiation, male infertility, spermatogenesis, and male reproductive function. Studies published between 2020 and 2026, available in full text and written in Portuguese, English, or Spanish, were included. Duplicate studies, incomplete publications, and articles not relevant to the topic were excluded. Initially, 647 studies were identified; after screening, duplicate removal, and eligibility assessment, 20 articles were selected for the final sample. The results demonstrated that both ionizing and non-ionizing radiation may cause alterations in male reproductive function, including reduced sperm motility, vitality, and concentration, sperm DNA damage, hormonal changes, oxidative stress, cellular apoptosis, and impaired spermatogenesis. It was also observed that factors such as intensity, duration, and occupational exposure influence the magnitude of reproductive damage. It is concluded that exposure to radiation represents a potential risk factor for male fertility, reinforcing the need for preventive measures, radiological protection, and further scientific investigations into its biological effects.*

**KEYWORDS:** Male fertility. Ionizing radiation. Non-ionizing radiation.

#### **RESUMEN**

*La creciente exposición humana a las radiaciones ionizantes y no ionizantes, impulsada por el avance tecnológico y la ampliación del uso de dispositivos electrónicos y procedimientos médicos radiológicos, ha generado preocupaciones acerca de los posibles impactos sobre la salud reproductiva masculina. El presente estudio tuvo como objetivo analizar los efectos de la radiación ionizante y no ionizante sobre la función reproductiva masculina, con base en la literatura científica reciente. Se trata de una revisión integradora de la literatura, realizada en las bases de datos PubMed, LILACS, Biblioteca Virtual en Salud (BVS) y SciELO, utilizando descriptores relacionados con radiación ionizante, radiación no ionizante, infertilidad masculina, espermatogénesis y función reproductiva masculina. Se incluyeron estudios publicados entre 2020 y 2026, disponibles en texto completo y en los idiomas portugués, inglés y español. Se excluyeron trabajos duplicados, estudios incompletos y publicaciones no pertinentes al tema. Inicialmente, se identificaron 647 estudios; después del proceso de selección, eliminación de duplicados y análisis de elegibilidad, 20 artículos conformaron la muestra final. Los resultados demostraron que tanto la radiación ionizante como la no ionizante pueden provocar alteraciones en la función reproductiva masculina, incluyendo reducción de la motilidad, vitalidad y concentración espermática, daños en el ADN de los espermatozoides, alteraciones hormonales, estrés oxidativo, apoptosis celular y deterioro de la espermatogénesis. Asimismo, se observó que factores como la intensidad, la duración y la exposición ocupacional influyen en la magnitud de los daños reproductivos. Se concluye que la exposición a las radiaciones representa un potencial factor de riesgo para la fertilidad masculina, lo que refuerza la necesidad de medidas preventivas, radioprotección y una mayor profundización de las investigaciones científicas sobre sus efectos biológicos.*

**PALABRAS CLAVE:** Fertilidad masculina. Radiación ionizante. Radiación no ionizante.

#### **INTRODUÇÃO**



A exposição humana às radiações ionizantes e não ionizantes tem aumentado significativamente nas últimas décadas em decorrência do avanço tecnológico, da expansão do uso de dispositivos eletrônicos e da crescente aplicação de fontes radiativas em setores como medicina, indústria e telecomunicações (Kaur; Rai; Singh, 2023). Esse cenário tem ampliado o interesse científico pelos possíveis efeitos biológicos das radiações, especialmente sobre a saúde reprodutiva masculina, considerando a elevada sensibilidade das células germinativas aos agentes físicos ambientais.

A literatura científica recente demonstra que diferentes tipos de radiação podem interferir em processos fisiológicos relacionados à função reprodutiva masculina, incluindo alterações na espermatogênese, nos parâmetros seminais, na integridade do DNA espermático e na regulação hormonal (Kaur; Rai; Singh, 2023). A radiação ionizante apresenta mecanismos de ação relativamente bem estabelecidos, caracterizados pela capacidade de promover ionização molecular, danos cromossômicos e alterações genéticas decorrentes da interação direta com o material biológico. Em contrapartida, os efeitos da radiação não ionizante permanecem objeto de intenso debate científico, uma vez que muitos dos mecanismos propostos envolvem processos indiretos, como aumento do estresse oxidativo, alterações mitocondriais e desequilíbrios celulares ainda não completamente elucidados.

Embora diversos estudos relatem associações entre a exposição às radiações e alterações reprodutivas masculinas, a interpretação desses resultados requer cautela. A identificação de uma associação estatística não implica necessariamente relação causal, especialmente diante da influência de fatores de confusão, como idade, hábitos de vida, condições ocupacionais, exposição concomitante a agentes químicos e variabilidade genética individual. Além disso, a plausibilidade biológica observada em estudos experimentais nem sempre se traduz em evidências conclusivas em populações humanas, evidenciando a necessidade de análises críticas que considerem as limitações metodológicas dos estudos disponíveis.

Ainda, é preciso ponderar a heterogeneidade dos achados científicos, pois enquanto algumas investigações identificam reduções na qualidade seminal, alterações hormonais e danos ao DNA espermático, outras não observam diferenças estatisticamente relevantes ou apontam efeitos dependentes da intensidade, frequência e duração da exposição. Essa diversidade de resultados decorre, em parte, das diferenças entre delineamentos experimentais, populações estudadas, métodos de mensuração da exposição e parâmetros reprodutivos avaliados, dificultando o estabelecimento de consensos acerca da magnitude real dos riscos envolvidos.



A relevância social da temática relaciona-se à crescente exposição populacional às radiações em ambientes ocupacionais, clínicos e cotidianos. Alterações na fertilidade masculina constituem importante questão de saúde pública, uma vez que podem repercutir na qualidade de vida, no aumento da demanda por terapias reprodutivas e nos custos assistenciais associados à infertilidade. No campo acadêmico, a discussão contribui para o aprofundamento das interfaces entre Biomedicina, biologia celular, genética, fisiologia reprodutiva e biofísica, favorecendo a compreensão dos mecanismos biológicos envolvidos e subsidiando estratégias de prevenção e radioproteção.

Frente à ampliação da produção científica sobre o tema e à heterogeneidade dos achados publicados, torna-se necessária uma síntese abrangente das evidências disponíveis acerca dos efeitos das radiações ionizantes e não ionizantes sobre a função reprodutiva masculina. Tal abordagem possibilita identificar padrões de evidência, lacunas investigativas e fatores associados aos danos reprodutivos descritos na literatura recente.

O estudo busca responder ao seguinte problema de pesquisa: de que maneira a exposição à radiação ionizante e não ionizante pode comprometer a função reprodutiva masculina?

O objetivo geral consiste em analisar os efeitos da radiação ionizante e não ionizante sobre a função reprodutiva masculina à luz da literatura científica recente. Como objetivos específicos, pretende-se: (i) descrever os mecanismos de ação da radiação ionizante e não ionizante no organismo humano; (ii) identificar os principais efeitos dessas radiações sobre o sistema reprodutor masculino; e (iii) discutir os fatores de risco e as implicações clínicas associados à exposição prolongada.

Optou-se pela revisão integrativa de literatura em razão da amplitude e da complexidade da temática investigada, que envolve diferentes delineamentos metodológicos, incluindo estudos experimentais, observacionais e revisões científicas. Diferentemente da revisão sistemática, que geralmente busca responder a uma questão específica mediante critérios mais restritivos de seleção e síntese das evidências, a revisão integrativa permite reunir e analisar criticamente diferentes tipos de estudos, proporcionando uma compreensão mais abrangente dos mecanismos biológicos, dos efeitos reprodutivos e das lacunas existentes no conhecimento científico sobre a exposição às radiações e a fertilidade masculina.

## **REFERENCIAL TEÓRICO**

### **Comprometimento da função reprodutiva**



A função reprodutiva masculina depende da adequada integração entre estruturas anatômicas, regulação endócrina, integridade genética e funcionalidade celular envolvidas na produção, maturação e transporte dos espermatozoides. Alterações nesses componentes podem comprometer a fertilidade masculina, repercutindo na capacidade fecundante e nos desfechos reprodutivos. Entre os principais determinantes da função reprodutiva destacam-se a espermatogênese, o equilíbrio hormonal, a qualidade seminal e a estabilidade do material genético das células germinativas. (Yin *et al.*, 2025).

A espermatogênese consiste em um processo biológico complexo que ocorre nos túbulos seminíferos e é regulado pelo eixo hipotálamo–hipófise–gonadal. A produção adequada de testosterona pelas células de Leydig exerce papel essencial na manutenção da diferenciação e maturação das células germinativas. Evidências experimentais sugerem que alterações na sinalização hormonal podem interferir na produção espermática e modificar parâmetros relacionados à função testicular (Jangid; Rai; Singh, 2024).

Além da regulação hormonal, a integridade do DNA espermático constitui importante marcador da saúde reprodutiva masculina. Danos genéticos, instabilidade cromossômica e alterações epigenéticas têm sido associados, em diferentes contextos clínicos e experimentais, à redução do potencial reprodutivo, falhas de fecundação e alterações no desenvolvimento embrionário (Kaur; Rai; Singh, 2023). Contudo, a relação entre determinados fatores ambientais e o dano genético espermático ainda apresenta heterogeneidade na literatura, especialmente em estudos envolvendo exposições de baixa intensidade ou longa duração.

Em nível celular e molecular, a manutenção da fertilidade masculina depende da integridade das células de Sertoli e de Leydig, do adequado funcionamento mitocondrial e da preservação dos mecanismos de reparo do DNA. Alterações nesses sistemas podem desencadear respostas celulares relacionadas ao estresse oxidativo, à ativação de vias pró-apoptóticas e à desregulação hormonal, comprometendo a diferenciação das células germinativas e a qualidade dos espermatozoides produzidos. Estudos recentes sugerem que diferentes agentes ambientais podem atuar sobre esses mecanismos, influenciando a homeostase testicular e a capacidade reprodutiva masculina (Yin *et al.*, 2025).

Os parâmetros seminais, tais como concentração, motilidade, morfologia e vitalidade espermática, permanecem entre os principais indicadores utilizados na avaliação da fertilidade masculina. Alterações nesses marcadores podem refletir disfunções em diferentes etapas da produção e maturação dos gametas masculinos, embora sua interpretação deva considerar fatores individuais, clínicos e ambientais que influenciam o potencial reprodutivo masculino (Motchidlover *et al.*, 2025).



Entre os mecanismos biológicos frequentemente investigados no comprometimento da função reprodutiva masculina destaca-se o estresse oxidativo. Estudos experimentais têm demonstrado que o desequilíbrio entre espécies reativas de oxigênio e sistemas antioxidantes pode favorecer danos celulares, alterações na membrana espermática, apoptose e prejuízos à espermatogênese (Huang *et al.*, 2022). Apesar da plausibilidade biológica desse mecanismo, a literatura indica que sua participação pode ocorrer em associação com fatores metabólicos, inflamatórios, ambientais e comportamentais, não sendo atribuível a um único agente causal.

Estudos observacionais também sugerem possíveis associações entre exposições ambientais, condições ocupacionais e alterações em parâmetros reprodutivos masculinos. Contudo, a interpretação desses resultados requer cautela diante da presença de potenciais fatores de confusão, diferenças metodológicas e limitações relacionadas à mensuração das exposições (Wdowiak *et al.*, 2020). Dessa forma, a compreensão do comprometimento da função reprodutiva masculina demanda abordagem multifatorial, baseada na integração crítica das evidências experimentais, clínicas e epidemiológicas.

### **Radiação não ionizante**

A radiação não ionizante (RNI) corresponde a uma forma de energia eletromagnética caracterizada por possuir frequência e energia insuficientes para promover ionização atômica. Diferentemente da radiação ionizante, sua interação com sistemas biológicos ocorre predominantemente por mecanismos físicos e bioquímicos que não envolvem remoção direta de elétrons da matéria. A RNI está amplamente distribuída no cotidiano humano, sendo proveniente de fontes naturais, como a radiação solar, e de fontes artificiais relacionadas à expansão tecnológica, incluindo sistemas de telecomunicações, dispositivos móveis, redes sem fio e equipamentos eletroeletrônicos (Silva, 2023).

A intensificação da exposição populacional a campos eletromagnéticos tem impulsionado o interesse científico acerca de seus possíveis efeitos biológicos, particularmente sobre a saúde reprodutiva masculina. Entretanto, a literatura disponível apresenta importante heterogeneidade metodológica, envolvendo diferenças de frequência, intensidade, duração da exposição, modelos experimentais e métodos de mensuração, circunstância que dificulta a consolidação de conclusões causais consistentes (Cordelli *et al.*, 2024; Kenny *et al.*, 2024).

No âmbito experimental, estudos *in vitro* e em modelos animais têm investigado potenciais repercussões da RNI sobre células germinativas, tecido testicular e parâmetros seminais. Parte das evidências experimentais sugere que determinadas condições de exposição podem estar associadas a alterações na motilidade espermática, integridade do DNA,



funcionalidade das células de Leydig e equilíbrio oxidativo celular. Contudo, a magnitude desses efeitos e sua relevância biológica permanecem dependentes das condições experimentais adotadas e da consistência metodológica dos estudos analisados. Em experimentos celulares, interferências na atividade esteroidogênica e em vias relacionadas à regulação hormonal foram observadas após exposição a radiofrequências eletromagnéticas. Contudo, esses achados não se reproduzem uniformemente entre diferentes protocolos experimentais, indicando influência relevante das condições de exposição e do modelo biológico empregado (Kaur; Rai; Singh, 2023; Jangid; Rai; Singh, 2024).

Revisões sistemáticas recentes reforçam essa necessidade de interpretação cautelosa. Cordelli *et al.* (2024), ao avaliarem estudos experimentais em mamíferos não humanos e espermatozoides humanos *in vitro*, identificaram evidências de possíveis alterações reprodutivas associadas à radiofrequência eletromagnética; entretanto, os autores destacam limitações relacionadas à variabilidade metodológica e à qualidade dos estudos incluídos. De modo semelhante, Motchidlover *et al.* (2025) apontam que parte da literatura descreve modificações em parâmetros seminais após exposição à radiação não ionizante, embora a consistência dos resultados permaneça variável entre os estudos analisados.

No campo epidemiológico, estudos observacionais têm explorado possíveis associações entre exposição a dispositivos emissores de radiofrequência e alterações na fertilidade masculina. Kenny *et al.* (2024), em revisão sistemática com metanálise dose-resposta, identificaram associações entre determinados padrões de exposição e alterações em alguns desfechos reprodutivos masculinos. Todavia, os próprios autores ressaltam limitações importantes relacionadas à mensuração da exposição, ao controle de fatores de confusão e à heterogeneidade populacional, impedindo o estabelecimento denexo causal definitivo. Situação semelhante é observada em investigações envolvendo outros potenciais desfechos em saúde associados à RNI, nas quais os resultados frequentemente permanecem inconclusivos ou metodologicamente limitados (Herkert; Cardoso; Carvalho, 2021).

Sob a perspectiva mecanística, hipóteses biológicas frequentemente discutidas incluem efeitos térmicos, alterações oxidativas, modificações metabólicas e possíveis interferências na sinalização celular associadas à exposição à radiação não ionizante. Evidências experimentais *in vitro* e em modelos animais sustentam a plausibilidade desses mecanismos, especialmente no que se refere a alterações na integridade espermática, no equilíbrio redox celular e na função endócrina testicular (Kaur; Rai; Singh, 2023; Jangid; Rai; Singh, 2024). Revisões sistemáticas recentes também descrevem possíveis alterações biológicas relacionadas à exposição a radiofrequências eletromagnéticas; contudo, ressaltam elevada heterogeneidade metodológica



entre os estudos, o que limita a extrapolação direta dos achados para populações humanas (Cordelli *et al.*, 2024; Motchidlover *et al.*, 2025). Dessa forma, embora existam hipóteses biologicamente plausíveis, sua relevância clínica em humanos permanece objeto de investigação contínua.

Em nível molecular, têm sido investigadas possíveis alterações na permeabilidade das membranas celulares, na atividade mitocondrial e na expressão de proteínas relacionadas à resposta ao estresse celular. Embora esses mecanismos apresentem plausibilidade biológica em modelos experimentais, sua ocorrência e relevância clínica em seres humanos ainda não estão plenamente estabelecidas, permanecendo como objeto de investigação científica.

Diante desse cenário, organismos reguladores nacionais e internacionais recomendam o monitoramento dos níveis de exposição e o cumprimento de parâmetros de segurança voltados à proteção populacional e ocupacional. A literatura especializada enfatiza que a interpretação dos possíveis efeitos da RNI deve considerar intensidade, frequência, tempo de exposição e qualidade metodológica das investigações disponíveis, evitando inferências causais além do nível de evidência atualmente estabelecido (Kenny *et al.*, 2024; Sienkiewicz *et al.*, 2025). Embora a radiação não ionizante esteja intrinsecamente associada aos avanços tecnológicos contemporâneos, permanece necessária a ampliação de estudos experimentais robustos, investigações observacionais bem controladas e sínteses sistemáticas capazes de esclarecer a magnitude e a consistência de seus possíveis efeitos sobre a saúde reprodutiva masculina.

### **Radiação ionizante**

A radiação ionizante caracteriza-se pela capacidade de remover elétrons dos átomos, promovendo processos de ionização decorrentes de sua elevada energia. Diferentemente da radiação não ionizante, esse tipo de radiação apresenta potencial para interagir diretamente com componentes celulares, especialmente com o material genético, por meio de efeitos diretos sobre o DNA ou de mecanismos indiretos relacionados à formação de espécies reativas de oxigênio e radicais livres (Saleh; Hassan, 2023). Entre as principais formas de radiação ionizante destacam-se os raios X, os raios gama e as partículas alfa e beta, amplamente empregados em aplicações diagnósticas, terapêuticas, industriais e científicas (Oliveira *et al.*, 2022).

Os efeitos biológicos da radiação ionizante apresentam relação com variáveis como dose absorvida, tempo de exposição, taxa de dose e sensibilidade do tecido exposto. Em termos gerais, exposições de elevada intensidade podem estar associadas a efeitos agudos, enquanto exposições cumulativas ou prolongadas têm sido investigadas quanto aos seus possíveis impactos genéticos, carcinogênicos e reprodutivos (Silva; Brito; Moura, 2022). Entretanto, a



magnitude desses efeitos pode variar conforme o contexto exposicional, não sendo apropriado assumir uniformidade de resposta entre diferentes populações ou condições clínicas.

No âmbito mecanístico, estudos experimentais têm demonstrado que a radiação ionizante pode induzir danos ao DNA, alterações oxidativas, apoptose celular e comprometimento da arquitetura testicular. Evidências laboratoriais apontam que tecidos reprodutivos masculinos apresentam elevada sensibilidade a alterações oxidativas e genotóxicas induzidas pela radiação, incluindo modificações na espermatogênese e na integridade celular testicular (Abedpour *et al.*, 2022; Huang *et al.*, 2022; Santos *et al.*, 2022). Contudo, parte desses achados deriva de modelos animais e experimentos *in vitro*, circunstância que exige cautela na extrapolação direta para populações humanas.

Os danos induzidos pela radiação ionizante podem ocorrer por mecanismos diretos e indiretos. Os efeitos diretos envolvem a quebra de ligações químicas no DNA, produzindo lesões de fita simples e dupla, enquanto os efeitos indiretos decorrem da radiólise da água e da consequente formação de espécies reativas de oxigênio. Essas alterações podem ativar vias de reparo genético, mecanismos apoptóticos e respostas inflamatórias que, quando persistentes ou intensas, favorecem prejuízos à espermatogênese e à funcionalidade das células germinativas.

No campo clínico e epidemiológico, investigações recentes têm explorado possíveis associações entre exposição à radiação ionizante e desfechos relacionados à fertilidade masculina, à função gamética e à saúde das gerações subsequentes. Li *et al.* (2024) destacam que a exposição paterna à radiação ionizante constitui tema de crescente interesse científico, sobretudo no que se refere a potenciais repercussões sobre fertilidade e saúde da prole. Todavia, os autores ressaltam que a literatura disponível ainda apresenta limitações metodológicas, heterogeneidade dos desenhos de estudo e dificuldades no isolamento de fatores de confusão.

A discussão sobre exposições em baixas doses permanece particularmente complexa. Dimitrova, Hristova e Petrova (2024) observam que os efeitos da radiação ionizante de baixa dose sobre gametas masculinos permanecem objeto de debate científico, coexistindo hipóteses de dano biológico, mecanismos adaptativos e incertezas relacionadas à dose-resposta. Em direção semelhante, Nakamura, Yoshida e Suwa (2024) argumentam que a detecção de efeitos transgeracionais em humanos envolve importantes desafios metodológicos e epidemiológicos, o que limita conclusões definitivas acerca da hereditariedade dos danos radioinduzidos.

A exposição ocupacional também é ponto de investigação, pois profissionais da saúde, particularmente aqueles atuantes em radiologia, medicina nuclear e radioterapia, encontram-se entre os grupos frequentemente monitorados quanto à exposição crônica à radiação ionizante, o que reforça a importância de medidas de radioproteção, dosimetria individual e monitoramento



contínuo dos níveis de exposição (Moura; Krause; Costa, 2024). Nesse cenário, recomenda-se interpretar os potenciais efeitos biológicos da radiação ionizante considerando o nível de evidência disponível, distinguindo-se cuidadosamente mecanismos experimentais, associações observacionais e inferências causais.

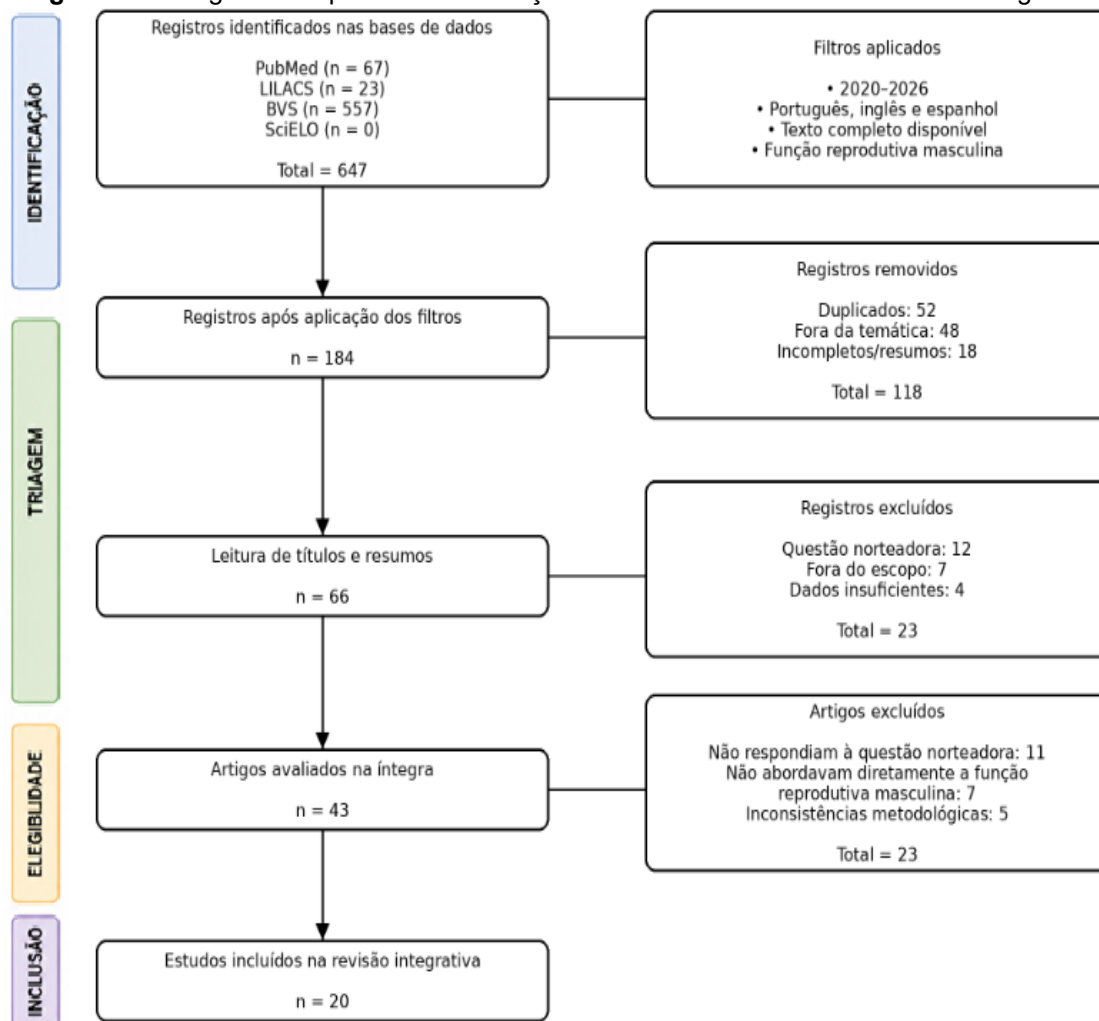
Além das abordagens preventivas convencionais, novas estratégias de radioproteção vêm sendo investigadas. Gomes, Santos e Moura (2025) descrevem o potencial de fungos melanizados como possíveis agentes radioprotetores naturais, em razão da capacidade da melanina de absorver e atenuar parte da energia radiativa. Embora tais aplicações permaneçam em estágio experimental, representam exemplo da expansão contemporânea das pesquisas voltadas à mitigação dos efeitos biológicos da radiação ionizante.

## METODOLOGIA

O presente estudo consistiu em uma revisão integrativa de literatura, método que possibilita reunir, analisar e sintetizar evidências científicas disponíveis acerca de determinada temática, favorecendo a compreensão ampliada sobre os efeitos da radiação ionizante e não ionizante na função reprodutiva masculina. A revisão foi conduzida em seis etapas: identificação do tema e formulação da questão norteadora; definição dos critérios de inclusão e exclusão; busca e seleção dos estudos; extração e categorização das informações; análise crítica dos achados; e síntese do conhecimento produzido. A questão norteadora definida foi: “De que maneira a exposição à radiação ionizante e não ionizante pode comprometer a função reprodutiva masculina?”

A busca bibliográfica foi realizada nas bases PubMed/MEDLINE, Literatura Latino-Americana e do Caribe em Ciências da Saúde (LILACS), Biblioteca Virtual em Saúde (BVS) e Scientific Electronic Library Online (SciELO), selecionadas em razão de sua relevância e abrangência na área da saúde. Foram empregados descritores indexados nos sistemas DeCS e MeSH, em português e inglês, incluindo: “radiação ionizante”, “radiação não ionizante”, “função reprodutiva masculina”, “infertilidade masculina”, “espermatozoides”, “*ionizing radiation*”, “*non-ionizing radiation*” e “*male reproductive function*”, combinados mediante os operadores booleanos AND e OR. A estratégia de busca utilizada correspondeu a: (“*Ionizing Radiation*” OR “*Non-Ionizing Radiation*” OR “*Electromagnetic Fields*”) AND (“*Male Reproductive Function*” OR “*Male Infertility*” OR “*Spermatogenesis*” OR “*Spermatozoa*” OR “*Reproductive Health*”).

**Figura 1.** Fluxograma do processo de seleção dos estudos incluídos na revisão integrativa



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A Figura 1 apresenta o fluxograma PRISMA referente às etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos utilizados nesta revisão integrativa. Inicialmente, foram identificados 647 estudos, distribuídos entre as bases consultadas: PubMed (n = 67), LILACS (n = 23), BVS (n = 557) e SciELO (n = 0). Em seguida, aplicaram-se filtros referentes ao período de publicação (2020–2026), idiomas (português, inglês e espanhol), disponibilidade do texto completo e pertinência temática à função reprodutiva masculina, permanecendo 184 registros.

Na etapa de triagem inicial, foram removidos 118 registros, correspondentes a 52 estudos duplicados, 48 estudos fora da temática e 18 trabalhos incompletos ou disponíveis apenas em formato de resumo, resultando em 66 estudos selecionados para leitura de títulos e



resumos. Após essa análise preliminar, 23 registros foram excluídos, dos quais 12 não atendiam à questão norteadora, 7 estavam fora do escopo da função reprodutiva masculina e 4 apresentavam dados insuficientes ou inadequação metodológica, totalizando 43 artigos selecionados para leitura na íntegra.

Na etapa de elegibilidade, após leitura completa dos 43 artigos, foram excluídos 23 estudos, sendo 11 por não responderem à questão norteadora, 7 por não abordarem diretamente a função reprodutiva masculina e 5 devido à insuficiência de dados ou inconsistências metodológicas. Ao final, 20 estudos compuseram a amostra final da revisão integrativa. Os dados extraídos foram organizados em quadros analíticos contendo autor, ano, objetivo, delineamento metodológico, principais achados e conclusões. Posteriormente, realizou-se análise descritiva, comparativa e interpretativa das evidências, buscando identificar mecanismos biológicos envolvidos, efeitos reprodutivos observados, limitações metodológicas e implicações clínicas associadas à exposição às radiações ionizante e não ionizante.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta a síntese dos artigos incluídos, contendo autores, ano de publicação, título traduzido para o português e os principais resultados identificados em cada estudo.

**Tabela 1.** Síntese dos estudos incluídos na revisão integrativa

N	Autor (Ano)	Título	Principais resultados
1	Kenny <i>et al.</i> (2024)	Os efeitos da exposição à radiofrequência na fertilidade masculina: uma revisão sistemática de estudos observacionais humanos com metanálise dose-resposta	A exposição prolongada à radiofrequência proveniente de telefones celulares foi associada à redução da motilidade espermática, alterações na concentração de espermatozoides e prejuízos à qualidade seminal, podendo comprometer a fertilidade masculina.
2	Motchidlover <i>et al.</i> (2025)	Impacto da radiação não ionizante na fertilidade masculina: uma revisão sistemática	A radiação não ionizante apresentou associação com diminuição da contagem, motilidade e vitalidade espermática, indicando interferência direta nos parâmetros seminais e possível comprometimento da função reprodutiva masculina.
3	Wdowiak <i>et al.</i> (2020)	Radiação ionizante ambiental e parâmetros seminais de homens com problemas reprodutivos	A exposição à radiação ionizante ambiental esteve relacionada à redução da morfologia normal dos espermatozoides e da vitalidade espermática, sugerindo danos às células germinativas masculinas.



4	Huang <i>et al.</i> (2022)	O dimetilsulfóxido atenua lesões testiculares induzidas por radiação por meio da facilitação do reparo de quebras duplas do DNA	A radiação ionizante provocou danos testiculares, apoptose celular, estresse oxidativo e alterações na espermatogênese, comprometendo a fertilidade masculina por meio de lesões no DNA das células germinativas.
5	Santos <i>et al.</i> (2022)	Losartana atenua danos induzidos por radiação nos testículos e acelera a regeneração tubular	A exposição à radiação ionizante causou atrofia tubular, redução da produção espermática, danos ao epitélio seminífero e diminuição da vitalidade espermática, afetando diretamente a função reprodutiva masculina.
6	Nakamura, Yoshida e Suwa (2024)	Três principais razões pelas quais os efeitos transgeracionais da radiação são difíceis de detectar em humanos	A radiação ionizante pode induzir mutações em células germinativas masculinas e alterações genéticas potencialmente transmissíveis às gerações futuras, embora os efeitos transgeracionais ainda sejam difíceis de detectar em humanos.
7	Abedpour <i>et al.</i> (2022)	Efeitos protetores do ácido clorogênico contra toxicidade testicular induzida por radiação ionizante	A radiação ionizante promoveu danos oxidativos, apoptose celular, alterações nos túbulos seminíferos e prejuízo da espermatogênese, reduzindo a qualidade e a funcionalidade espermática.
8	Dimitrova, Hristova e Petrova (2024)	Exposição à radiação ionizante de baixa dose em gametas masculinos humanos: dano ou benefício	A exposição à radiação ionizante de baixa dose foi relacionada a alterações na qualidade dos gametas masculinos, danos celulares e possíveis modificações na fertilidade, embora alguns estudos apontem respostas adaptativas em determinadas condições.
9	Yin <i>et al.</i> (2025)	Radiação ionizante de baixa dose e imunidade reprodutiva masculina: elucidando modulações sutis e implicações de longo prazo	A radiação ionizante de baixa dose desencadeou estresse oxidativo, alterações epigenéticas, danos ao DNA e disfunções imunológicas no ambiente testicular, comprometendo a espermatogênese e a fertilidade masculina.
10	Kaur, Rai e Singh (2023)	Riscos genotóxicos da radiação de radiofrequência para a saúde reprodutiva masculina	A exposição prolongada à radiação de radiofrequência esteve associada ao aumento do estresse oxidativo, danos ao DNA espermático, alterações hormonais e redução da qualidade seminal, contribuindo para infertilidade masculina.
11	Simson, Vashistha e Sethi (2024)	Ondas invisíveis, consequências visíveis: o papel da radiação ambiental na fertilidade humana	A exposição contínua à radiação não ionizante proveniente de dispositivos eletrônicos esteve associada à redução da contagem, motilidade, morfologia e viabilidade espermática, podendo contribuir para infertilidade masculina.
12	Haji e Ali (2025)	Impacto da radiação de celulares na fertilidade masculina humana	A exposição prolongada à radiação de celulares promoveu redução significativa da motilidade, concentração e morfologia

			espermática, indicando associação negativa entre uso excessivo de celulares e fertilidade masculina.
13	Jangid, Rai e Singh (2024)	Radiações eletromagnéticas de radiofrequência interferem nas funções das células de <i>Leydig in vitro</i>	A radiofrequência reduziu a produção de testosterona, aumentou o estresse oxidativo e comprometeu a proliferação celular das células de Leydig, afetando mecanismos hormonais essenciais para a espermatogênese.
14	Saleh e Hassan (2023)	Radiação ionizante e saúde reprodutiva	A radiação ionizante foi associada a danos celulares, alterações no DNA e efeitos gonadotóxicos capazes de comprometer a fertilidade e a função reprodutiva humana.
15	Sienkiewicz <i>et al.</i> (2025)	O impacto dos dispositivos emissores de radiação eletromagnética não ionizante no sistema reprodutor masculino	A exposição prolongada à radiação não ionizante esteve relacionada ao aumento do estresse oxidativo, alterações hormonais e prejuízos na motilidade, viabilidade e concentração espermática.
16	Cordelli <i>et al.</i> (2024)	Efeitos da exposição a campos eletromagnéticos de radiofrequência na fertilidade masculina	A exposição à radiofrequência foi associada à redução da contagem espermática, alterações na vitalidade e morfologia dos espermatozoides, toxicidade testicular e alterações hormonais relacionadas à testosterona.
17	Georgakopoulos <i>et al.</i> (2024)	Radioterapia e função testicular: uma revisão abrangente dos efeitos induzidos pela radiação com ênfase na espermatogênese	Evidenciou que a radiação compromete a função reprodutiva masculina, causando alterações na espermatogênese, redução da qualidade espermática, oligospermia/azoospermia e possíveis alterações hormonais, mesmo em baixas doses.
18	Tamam <i>et al.</i> (2025)	O efeito da radiação ionizante sobre células estromais intersticiais testiculares	Demonstrou que a radiação ionizante provoca danos testiculares dependentes da dose, com degeneração da espermatogênese, dano ao DNA e alterações em células intersticiais associadas à recuperação ou agravamento da função reprodutiva masculina.
19	Zhou <i>et al.</i> (2025)	Disrupção induzida por radiação ionizante do eixo Rela-Bclaf1-spliceossomo em espermatozócitos primários	A radiação ionizante comprometeu a espermatogênese, reduzindo parâmetros espermáticos e alterando genes relacionados ao spliceossomo em espermatozócitos primários. Agonistas de NF-κB apresentaram potencial efeito protetor sobre a função reprodutiva masculina.
20	LI, J. <i>et al.</i> (2024)	Efeitos da exposição paterna à radiação ionizante na fertilidade e na saúde dos filhotes.	A exposição paterna aguda à radiação ionizante (6,4 Gy) provocou perda temporária da fertilidade em camundongos, com recuperação entre 10 e 11 semanas após a irradiação. Após a recuperação, os



machos irradiados geraram descendentes com parâmetros reprodutivos, metabólicos e neurocomportamentais semelhantes aos do grupo controle.

---

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Dessa forma, considerando os 20 estudos selecionados, fundamentaram-se dois tópicos de discussão, a saber: principais efeitos dessas radiações (ionizante e não ionizante) sobre o sistema reprodutor masculino; e fatores de risco e implicações clínicas associadas à exposição prolongada.

### **Principais efeitos dessas radiações sobre o sistema reprodutor masculino**

A análise dos estudos selecionados evidencia que os efeitos das radiações ionizantes e não ionizantes sobre a função reprodutiva masculina devem ser interpretados à luz dos diferentes níveis de evidência disponíveis. Enquanto os achados relacionados à radiação ionizante apresentam maior consistência entre estudos clínicos observacionais, modelos animais e investigações mecanísticas, as evidências referentes à radiação não ionizante permanecem mais heterogêneas e marcadas por limitações metodológicas. Dessa forma, a interpretação conjunta dos resultados requer distinção entre evidências provenientes de estudos em humanos, experimentos *in vitro* e modelos animais, evitando extrapolações diretas entre diferentes desenhos de pesquisa.

No contexto da radiação não ionizante, os estudos em humanos sugerem associações entre a exposição à radiofrequência e alterações seminais, porém com baixo grau de certeza. Kenny *et al.* (2024), em revisão sistemática de estudos observacionais humanos, identificaram evidências de muito baixa certeza para alterações em concentração, morfologia, motilidade progressiva e contagem total de espermatozoides, destacando que a mensuração indireta da exposição, baseada principalmente no tempo autorreferido de uso de telefones celulares, dificulta o estabelecimento de relações causais robustas. De modo semelhante, Haji e Ali (2025), em estudo transversal envolvendo 113 homens, observaram redução significativa da motilidade e da concentração espermática nos indivíduos com maior tempo diário de exposição ao celular, mas reconheceram que fatores comportamentais e ambientais não controlados podem influenciar esses resultados.

Em contraste, estudos experimentais fornecem evidências mecanísticas mais consistentes para a radiação não ionizante. Cordelli *et al.* (2024), ao sintetizarem estudos com mamíferos não humanos e espermatozoides humanos expostos *in vitro*, identificaram associações entre a exposição à radiofrequência e redução da taxa de gravidez, diminuição da



contagem espermática e prejuízo da vitalidade celular, embora a maioria dos estudos apresentasse limitações relacionadas ao risco de viés e à caracterização da dosimetria. Jangid, Rai e Singh (2024), em modelo *in vitro* utilizando linhagem de células de Leydig murinas, demonstraram redução da produção de testosterona, diminuição da proliferação celular e aumento das espécies reativas de oxigênio após exposição à radiofrequência. Esses achados reforçam a plausibilidade biológica dos efeitos reprodutivos, mas não constituem evidência direta de dano clínico em humanos.

As revisões narrativas e sistemáticas também reforçam a necessidade de cautela na interpretação dos resultados. Motchidlover *et al.* (2025) identificaram que a motilidade e a vitalidade espermática foram os parâmetros mais frequentemente afetados pela exposição à radiação não ionizante, embora tenham ressaltado a necessidade de estudos adicionais com tecnologias mais recentes e protocolos padronizados. Simson, Vashistha e Sethi (2024) destacaram que os efeitos descritos em estudos *in vitro* e *in vivo* não devem ser automaticamente extrapolados para populações humanas, especialmente diante da diversidade de frequências, intensidades e padrões de exposição existentes. Kaur, Rai e Singh (2023) apontam que os mecanismos genotóxicos associados à radiofrequência, como danos ao DNA, formação de micronúcleos e aumento do estresse oxidativo, apresentam resultados contraditórios entre diferentes modelos experimentais.

Por outro lado, os efeitos da radiação ionizante apresentam maior convergência entre os diferentes níveis de evidência. Estudos observacionais em humanos, como o de Wdowiak *et al.* (2020), identificaram associação entre a exposição à radiação ambiental de fundo e piora da morfologia espermática em homens com problemas reprodutivos, sugerindo que mesmo exposições crônicas de baixa intensidade podem influenciar parâmetros seminais. Revisões recentes, como as de Dimitrova, Hristova e Petrova (2024) e Yin *et al.* (2025), reforçam que a exposição à radiação ionizante está relacionada à indução de estresse oxidativo, instabilidade genômica, alterações epigenéticas e desregulação imunológica do microambiente testicular, embora persistam controvérsias quanto aos efeitos de baixas doses.

Os modelos animais aprofundam a compreensão desses mecanismos ao demonstrar relações dose-dependentes entre exposição e dano testicular. Huang *et al.* (2022) verificaram que a radiação promove redução do peso testicular, degeneração dos túbulos seminíferos, apoptose celular e comprometimento da fertilidade, sendo parcialmente revertida por estratégias antioxidantes que favorecem o reparo do DNA. Santos *et al.* (2022) observaram que a losartana acelerou a regeneração tubular em ratos irradiados, embora não tenha prevenido os danos apoptóticos iniciais decorrentes da exposição. Resultados semelhantes foram descritos por



Abedpour *et al.* (2022), que evidenciaram melhora dos parâmetros espermáticos e redução do estresse oxidativo após administração de ácido clorogênico.

Entretanto, os próprios modelos experimentais demonstram que os efeitos da radiação ionizante não são uniformes nem irreversíveis. Li *et al.* (2024) verificaram perda temporária da fertilidade em camundongos submetidos à irradiação aguda, seguida de recuperação funcional entre a décima e a décima primeira semana após a exposição, sem prejuízos reprodutivos, metabólicos ou neurocomportamentais detectáveis na prole concebida após esse período. Esses achados indicam que fatores como dose absorvida, intervalo pós-exposição, estágio das células germinativas atingidas e capacidade regenerativa do tecido testicular modulam a magnitude do dano biológico.

Portanto, embora ambas as formas de radiação possam interferir na saúde reprodutiva masculina, os níveis de evidência disponíveis não possuem o mesmo peso científico. A radiação ionizante apresenta maior robustez argumentativa, sustentada pela convergência entre estudos humanos, revisões especializadas e modelos experimentais que descrevem mecanismos biológicos consistentes. Em contrapartida, a radiação não ionizante apresenta evidências sugestivas, porém ainda marcadas por heterogeneidade metodológica, baixa certeza em estudos observacionais e dificuldade de extrapolação dos resultados experimentais para populações humanas. Assim, os achados disponíveis recomendam cautela interpretativa e reforçam a necessidade de investigações futuras com melhor caracterização da exposição, padronização metodológica e integração entre diferentes níveis de evidência.

### **Fatores de risco e implicações clínicas associadas à exposição prolongada**

A análise dos fatores de risco e das implicações clínicas associadas à exposição prolongada à radiação evidencia que a magnitude dos efeitos reprodutivos masculinos depende não apenas do tipo de radiação, mas também do contexto de exposição, da dose absorvida, da duração do contato e do nível de evidência disponível. Nesse sentido, é fundamental diferenciar os achados provenientes de estudos clínicos em humanos, modelos experimentais e revisões mecanísticas, evitando generalizações indevidas acerca dos riscos reprodutivos.

No caso da radiação ionizante, os fatores de risco estão mais frequentemente relacionados às exposições ocupacionais, médicas, ambientais ou acidentais. Profissionais da radiologia, medicina nuclear, radioterapia, indústria nuclear e indivíduos submetidos a procedimentos diagnósticos ou terapêuticos repetidos constituem grupos potencialmente mais vulneráveis, especialmente quando há falhas nas medidas de radioproteção, monitoramento dosimétrico e controle da exposição. Saleh e Hassan (2023) destacam que a radiação ionizante



possui reconhecido potencial gonadotóxico, podendo comprometer células germinativas, estruturas testiculares e a integridade do DNA, sobretudo em cenários de exposições cumulativas ou de maiores doses. Entretanto, os autores ressaltam que a magnitude desses riscos varia conforme o tipo de exposição e as estratégias de proteção adotadas.

Os estudos observacionais em humanos oferecem evidências clínicas relevantes, embora menos numerosas quando comparadas aos estudos experimentais. Wdowiak *et al.* (2020), ao analisarem 4.250 espermogramas de homens com problemas reprodutivos, observaram associação entre exposição ambiental à radiação de fundo e redução da proporção de espermatozoides com morfologia normal, sugerindo que exposições crônicas podem influenciar parâmetros seminais, ainda que não permitam estabelecer causalidade direta. Esses achados reforçam a necessidade de vigilância ocupacional e acompanhamento reprodutivo em populações expostas, especialmente diante da dificuldade de mensurar precisamente a dose gonadal acumulada ao longo da vida.

Em contraste, as principais implicações clínicas descritas na literatura derivam, predominantemente, de modelos animais e estudos experimentais, nos quais é possível controlar a dose e caracterizar os mecanismos biológicos envolvidos. Huang *et al.* (2022) demonstraram que a exposição à radiação promove redução do peso testicular, degeneração dos túbulos seminíferos, aumento da apoptose germinativa e comprometimento da fertilidade, sendo observada melhora parcial mediante intervenção radioprotetora com dimetilsulfóxido. Santos *et al.* (2022), em ratos submetidos à irradiação escrotal, verificaram que a losartana favoreceu a regeneração tubular tardia, embora não tenha prevenido os danos apoptóticos iniciais induzidos pela radiação. Abedpour *et al.* (2022) observaram que o ácido clorogênico reduziu o estresse oxidativo, modulou proteínas relacionadas à apoptose e melhorou parâmetros espermáticos em camundongos irradiados. Assim, infertilidade temporária ou permanente, redução da espermatogênese, alterações hormonais e danos estruturais testiculares constituem implicações clínicas plausíveis, porém muitas delas derivadas de evidências pré-clínicas.

As exposições de baixa dose e os efeitos de longo prazo representam uma das áreas de maior incerteza científica. Dimitrova, Hristova e Petrova (2024) destacam que os resultados disponíveis são contraditórios, coexistindo evidências de dano celular, respostas adaptativas e hipóteses de radioadaptação, dependendo do modelo experimental empregado e do estágio de desenvolvimento das células germinativas avaliadas. Yin *et al.* (2025) ampliam essa discussão ao demonstrar que baixas doses de radiação ionizante podem modificar o microambiente imunológico testicular, promovendo alterações epigenéticas, inflamatórias e imunorregulatórias potencialmente relacionadas à infertilidade e à instabilidade genômica. Esses mecanismos



sugerem que os riscos não dependem exclusivamente da morte celular direta, mas também de alterações sutis e persistentes na homeostase testicular.

Outro aspecto que exige interpretação cautelosa refere-se aos efeitos transgeracionais. Nakamura, Yoshida e Suwa (2024) demonstram que, embora mutações germinativas induzidas por radiação sejam claramente observadas em modelos animais, a demonstração desses efeitos em humanos permanece limitada por fatores biológicos e metodológicos, como a ausência de marcadores altamente sensíveis, a baixa frequência de mutações detectáveis e a ocorrência de perdas gestacionais espontâneas. Dessa forma, a ausência de evidências conclusivas em humanos não deve ser interpretada como ausência absoluta de risco, mas sim como reflexo das dificuldades inerentes à investigação epidemiológica desse fenômeno.

Os estudos experimentais também demonstram que os efeitos reprodutivos da radiação ionizante não são necessariamente permanentes. Li *et al.* (2024), em modelo murino, observaram perda transitória da fertilidade após exposição aguda à radiação, seguida de recuperação funcional da espermatogênese entre a décima e a décima primeira semana pós-irradiação. Além disso, os descendentes concebidos após esse período de recuperação não apresentaram alterações reprodutivas, metabólicas ou neurodesenvolvimentais detectáveis. Esses achados sugerem que fatores como intervalo entre exposição e concepção, capacidade regenerativa testicular e estágio das células germinativas atingidas podem modificar substancialmente o prognóstico reprodutivo.

Portanto, os fatores de risco associados à exposição prolongada devem ser interpretados segundo a natureza da evidência disponível. Os dados oriundos de estudos humanos apontam para possíveis repercussões clínicas e justificam medidas rigorosas de radioproteção, sobretudo em indivíduos ocupacionalmente expostos. Entretanto, as implicações mecânicas mais detalhadas, incluindo apoptose, estresse oxidativo, alterações epigenéticas e comprometimento estrutural dos testículos, derivam majoritariamente de modelos experimentais. Assim, embora os potenciais efeitos adversos da radiação ionizante sobre a saúde reprodutiva masculina sejam biologicamente plausíveis e clinicamente acentuados, persistem lacunas importantes quanto aos impactos de baixas doses, aos desfechos transgeracionais e à extrapolação dos achados pré-clínicos para populações humanas, avigorando a necessidade de estudos longitudinais com melhor caracterização da exposição e estratificação dos níveis de evidência.



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo analisar os efeitos da radiação ionizante e não ionizante sobre a função reprodutiva masculina, a partir da síntese das evidências científicas publicadas nos últimos anos. Os resultados demonstraram que ambas as formas de radiação apresentam potencial para interferir na saúde reprodutiva masculina, porém com diferentes níveis de evidência, mecanismos biológicos e graus de certeza científica.

As evidências relacionadas à radiação ionizante mostraram-se mais consistentes e robustas, sustentadas pela convergência entre estudos experimentais, revisões especializadas e alguns achados observacionais em humanos. Os principais efeitos descritos incluem danos ao DNA, estresse oxidativo, apoptose de células germinativas, alterações na espermatogênese, comprometimento dos túbulos seminíferos e possíveis repercussões hormonais. Apesar disso, permanecem incertezas relevantes quanto aos impactos decorrentes de exposições de baixa dose, à ocorrência de respostas adaptativas e à real magnitude dos efeitos transgeracionais em seres humanos.

Por sua vez, a radiação não ionizante, especialmente aquela proveniente de telefones celulares, redes Wi-Fi e outros dispositivos emissores de radiofrequência, apresentou evidências sugestivas de associação com alterações em parâmetros seminais, como motilidade, concentração, vitalidade e morfologia espermática. Entretanto, essas conclusões devem ser interpretadas com cautela, uma vez que os estudos humanos disponíveis apresentam baixa ou muito baixa certeza, decorrente da heterogeneidade metodológica, da dificuldade em mensurar adequadamente a exposição e da limitada capacidade de controle de fatores de confusão.

Como principal contribuição desta revisão, destaca-se a demonstração de que a força das evidências varia conforme o tipo de radiação e o delineamento dos estudos analisados. Enquanto os modelos experimentais fornecem importantes explicações mecanísticas para os danos observados, os estudos clínicos e epidemiológicos ainda são insuficientes para confirmar, com elevado grau de certeza, diversos desfechos reprodutivos descritos na literatura. Dessa forma, implicações clínicas como alterações seminais transitórias, comprometimento da espermatogênese e infertilidade associada à radiação ionizante apresentam maior respaldo científico, ao passo que efeitos decorrentes da exposição crônica à radiação não ionizante e possíveis repercussões transgeracionais permanecem, em grande medida, como hipóteses que necessitam de confirmação adicional.

Entre as principais lacunas identificadas, destacam-se a ausência de padronização dos métodos de avaliação da exposição, a escassez de estudos longitudinais em humanos, a limitada



investigação sobre exposições de baixa dose e a insuficiência de pesquisas capazes de integrar desfechos clínicos, laboratoriais e moleculares. O preenchimento dessas lacunas é fundamental para aprimorar a avaliação dos riscos reprodutivos, subsidiar estratégias de prevenção e fortalecer as recomendações relacionadas à radioproteção.

Conclui-se, portanto, que a exposição às radiações constitui uma questão relevante para a saúde pública e para a prática biomédica, exigindo monitoramento contínuo e produção de evidências de maior qualidade metodológica. Investigações futuras devem priorizar delineamentos prospectivos, melhor caracterização das exposições e integração entre evidências experimentais, clínicas e epidemiológicas, de modo a ampliar a compreensão dos reais impactos das radiações sobre a fertilidade masculina.

## REFERÊNCIAS

ABEDPOUR, N. *et al.* Protective effects of chlorogenic acid against ionizing radiation-induced testicular toxicity. **Heliyon**, v. 8, n. 10, p. e10798, 2022.

CORDELLI, E. *et al.* Effects of radiofrequency electromagnetic field (RF-EMF) exposure on male fertility: a systematic review of experimental studies on non-human mammals and human sperm *in vitro*. **Environment International**, v. 185, p. 108509, mar. 2024.

DIMITROVA, T.; HRISTOVA, E.; PETROVA, N. Low-dose ionizing radiation exposure on human male gametes: damage or benefit. *Life*, Basel, v. 14, n. 7, p. 830, 2024.

GEORGAKOPOULOS, I. *et al.* Radiotherapy and testicular function: a comprehensive review of the radiation-induced effects with an emphasis on spermatogenesis. **Biomedicines**, v. 12, n. 7, p. 1492, 2024.

GOMES, B. I. B.; SANTOS, A. M.; MOURA, B. L. Os fungos melanizados e atenuação da radiação ionizante: revisão bibliográfica. **Research, Society and Development**, v. 14, n. 12, p. e163141250422, 2025.

HAJI, S. O.; ALI, R. T. Impact of cellphone radiation on human male fertility. **Kirkuk Journal of Medical Sciences**, v. 13, n. 2, p. 32–37, 2025.

HERKERT, C. M. M.; CARDOSO, A. I. Q.; CARVALHO, A. M. A. C. Sources of non-ionizing radiation and cases of childhood leukemia: an integrative review. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 13, p. e19101320745, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i13.20745.

HUANG, Z. *et al.* Dimethyl sulfoxide attenuates radiation-induced testicular injury through facilitating DNA double-strand break repair. **Oxidative Medicine and Cellular Longevity**, v. 2022, p. 9137812, 2022. DOI: 10.1155/2022/9137812.

JANGID, P.; RAI, U.; SINGH, R. Radio frequency electromagnetic radiations interfere with the Leydig cell functions *in vitro*. **PLoS One**, v. 19, n. 5, p. e0299017, 2024.



KAUR, P.; RAI, U.; SINGH, R. Genotoxic risks to male reproductive health from radiofrequency radiation. **Cells**, v. 12, n. 4, p. 594, 2023.

KENNY, R. P. W. *et al.* The effects of radiofrequency exposure on male fertility: a systematic review of human observational studies with dose-response meta-analysis. **Environment International**, v. 190, p. 108817, 2024.

LI, J. *et al.* Effects of paternal ionizing radiation exposure on fertility and offspring's health. **Reproductive Medicine and Biology**, v. 23, n. 1, p. e12567, 2024.

MOTCHIDLOVER, L.; SARI-MINODIER, I.; SUNYACH, C.; METZLER-GUILLEMAIN, C.; PERRIN, J. Impact of non-ionising radiation on male fertility: a systematic review. *French Journal of Urology*, v. 35, n. 1, p. 102800, 2025. DOI: 10.1016/j.fjurol.2024.102800.

MOURA, S. S.; KRAUSE, M. O.; COSTA, A. P. A. O. Exposição à radiação ionizante nos profissionais radiologistas: uma revisão integrativa. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 10, n. 11, p. 7390–7400, 2024. DOI: 10.51891/rease.v10i11.17180.

NAKAMURA, N.; YOSHIDA, N.; SUWA, T. Three major reasons why transgenerational effects of radiation are difficult to detect in humans. **International Journal of Radiation Biology**, v. 100, n. 9, p. 1297–1311, 2024. DOI: 10.1080/09553002.2023.2187478.

OLIVEIRA, L. G. *et al.* Como a genética contribuiu para compreender os efeitos biológicos da exposição humana à radiação ionizante de Césio-137? **Genética na Escola**, São Paulo, v. 17, n. 2, p. 158–167, 2022. DOI: 10.55838/1980-3540.ge.2022.437.

SALEH, H. M.; HASSAN, A. I. Ionizing radiation and reproductive health. **Frontiers in Public Health**, v. 11, p. 1147934, 2023.

SANTOS, L. L. M. *et al.* Losartan attenuates radiation-induced damage on testes and accelerates tubular regeneration. **Frontiers in Reproductive Health**, v. 4, p. 904804, 2022. DOI: 10.3389/frph.2022.904804.

SIENKIEWICZ, M. *et al.* The impact of non-ionizing electromagnetic radiation emitting devices on the male reproductive system. **Quality in Sport**, v. 38, p. 57821, 2025.

SIMSON, D. K.; VASHISTHA, A.; SETHI, J. S. Invisible waves, visible consequences: environmental radiation's role in human fertility. **Integrative Medicine: A Clinician's Journal**, v. 23, n. 6, p. 10, 2024.

TAMAM, E. *et al.* The effect of ionizing radiation on testicular interstitial stromal cells. **Reproductive Medicine and Biology**, v. 24, n. 1, p. e12639, 2025.

WDOWIAK, A. *et al.* Background ionizing radiation and semen parameters of men with reproductive problems. **Annals of Agricultural and Environmental Medicine**, v. 27, n. 1, 2020.

YIN, J. *et al.* Low-dose ionizing radiation and male reproductive immunity: elucidating subtle modulations and long-term health implications. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 26, n. 5, p. 2269, 2025.



ZHOU, H. *et al.* Ionizing radiation-induced disruption of Rela-Bclaf1-spliceosome regulatory axis in primary spermatocytes causing spermatogenesis dysfunction. **Cell Communication and Signaling**, v. 23, n. 1, p. 58, 2025.