

UNIVERSIDADE PAULISTA

GABRIELE SANTOS CARVALHO

RADIAÇÃO UV E ENVELHECIMENTO CELULAR: avaliação da relação entre dano ao DNA e encurtamento dos telômeros.

GOIÂNIA

2025

NOTA FINAL = 9,3

GABRIELE SANTOS CARVALHO

RADIAÇÃO UV E ENVELHECIMENTO CELULAR: avaliação da relação entre dano ao DNA e encurtamento dos telômeros.

Trabalho de conclusão de curso para obtenção do título de graduação em Biomedicina apresentado à Universidade Paulista – UNIP.

Orientador(a): Prof(a). Mariana Félix de Souza Prudente

GOIÂNIA

2025

CIP - Catalogação na Publicação

CARVALHO, GABRIELE

RADIAÇÃO UV E ENVELHECIMENTO CELULAR: avaliação da
relação entre dano ao DNA e encurtamento dos telômeros / GABRIELE
CARVALHO. - 2025.

21 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) apresentado ao Instituto
de Ciência da Saúde da Universidade Paulista, GOIANIA, 2025.

Área de Concentração: SAUDE.

Orientador: Prof. MARIANA PRUDENTE.

1. Radiação UV. 2. raios ultravioletas. 3. telômeros. 4. danos. 5. DNA.
I. PRUDENTE, MARIANA (orientador). II. Título.

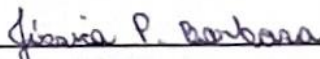
GABRIELE SANTOS CARVALHO

RADIAÇÃO UV E ENVELHECIMENTO CELULAR: AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE
DANO AO DNA E ENCURTAMENTO DOS TELÔMEROS

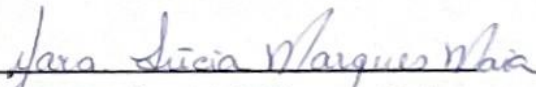
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Ciências da Saúde da
Universidade Paulista, *Campus Flamboyant*,
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Biomedicina.

Aprovado em: 03 / 12 / 2025

BANCA EXAMINADORA



Profa. Dra. Jéssica Pereira Barbosa
Universidade Paulista - UNIP



Profa. Ma. Yara Lúcia Marques Maia
Universidade Paulista - UNIP



Prof. Dr. Milton Camplesi Júnior
Universidade Paulista - UNIP

*Dedico este trabalho a todos que, direta
ou indiretamente, contribuíram para minha
formação acadêmica e pessoal,
incentivando-me a persistir e acreditar no
valor do conhecimento.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me sustentar, iluminar meus passos e me dar forças para superar cada desafio desta jornada acadêmica. À minha família, deixo minha gratidão mais profunda pelo apoio constante, compreensão, motivação e por nunca deixarem que eu desistisse dos meus sonhos. Meus sinceros agradecimentos aos meus amigos, que compartilharam momentos de dificuldade e celebração, oferecendo sempre palavras de incentivo.

Expresso também minha imensa gratidão aos profissionais biomédicos que me acompanharam nos estágios, pela paciência, dedicação e por transmitirem conhecimentos essenciais que contribuíram de forma significativa para meu crescimento acadêmico e profissional. Agradeço igualmente aos professores biomédicos do curso, que com compromisso, orientação e excelência no ensino, foram fundamentais para minha formação e para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para esta conquista, deixo meu mais sincero muito obrigada.

RESUMO

O envelhecimento celular resulta da interação entre fatores internos e externos, como alimentação inadequada, consumo de álcool, exposição à radiação ultravioleta (UV) e acúmulo de radicais livres, que comprometem a integridade estrutural das células e aceleram a senescência. Entre os principais mecanismos envolvidos destacam-se o estresse oxidativo, decorrente do desequilíbrio entre produção de radicais livres e defesa antioxidante, e o encurtamento dos telômeros, estruturas responsáveis pela proteção dos cromossomos e pela estabilidade genômica. Este trabalho investigou como a radiação UV influencia esses processos ao causar danos ao DNA e favorecer a diminuição progressiva dos telômeros. A análise dos estudos selecionados demonstra que a radiação UV aumenta o estresse oxidativo, induz mutações e lesões no DNA nuclear e acelera o desgaste telomérico, elevando o risco de envelhecimento precoce e doenças, como o câncer de pele. Evidenciou-se também que substâncias fotoprotetoras e compostos antioxidantes podem reduzir significativamente esses danos, enquanto níveis controlados de exposição solar contribuem para a síntese de vitamina D. Conclui-se que a radiação UV exerce papel central no comprometimento da integridade celular, reforçando a importância da fotoproteção, de estratégias preventivas e da necessidade de novas pesquisas sobre a interação entre UV, telômeros e telomerase.

Palavras-chave: Radiação UV; raios ultravioletas; telômeros; danos; DNA.

ABSTRACT

Cellular aging results from the interaction of internal and external factors such as inadequate diet, alcohol consumption, ultraviolet (UV) radiation exposure, and the accumulation of free radicals, which compromise cellular integrity and accelerate senescence. Among the main mechanisms involved are oxidative stress—caused by the imbalance between free radical production and antioxidant defenses—and telomere shortening, structures responsible for chromosome protection and genomic stability. This study investigated how UV radiation influences these processes by inducing DNA damage and promoting progressive telomere erosion. The analysis of the selected studies demonstrates that UV radiation increases oxidative stress, induces mutations and nuclear DNA lesions, and accelerates telomere shortening, raising the risk of premature aging and diseases such as skin cancer. The findings also show that photoprotective substances and antioxidant compounds can significantly reduce these damages, while controlled levels of UV exposure contribute to vitamin D synthesis. It is concluded that UV radiation plays a central role in compromising cellular integrity, reinforcing the importance of photoprotection, preventive strategies, and the need for further research on the interaction between UV radiation, telomeres, and telomerase.

Keywords: UV radiation; ultraviolet rays; telomeres; damage; DNA.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1 Envelhecimento celular e seus fatores	11
2.2 Radiação e envelhecimento celular	11
2.3 Radiação e seus tipos	12
2.4 Consequências da exposição à radiação.....	12
3 METODOLOGIA	13
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	20
REFERÊNCIAS	21

1 INTRODUÇÃO

Os telômeros são estruturas especializadas localizadas nas extremidades dos cromossomos e exercem um papel fundamental na preservação da integridade genética. Atuando como marcadores biológicos, os telômeros estão diretamente relacionados ao processo de envelhecimento celular e ao controle do número de divisões celulares, fenômeno conhecido como "relógio mitótico". A cada ciclo de replicação celular, ocorre o encurtamento progressivo dessas estruturas, o que limita a capacidade proliferativa das células, culminando no envelhecimento e na senescência celular. (Smith; Pendlebury; Nandakumar, 2020)

Diversos fatores podem contribuir para o encurtamento acelerado dos telômeros e, conseqüentemente, para o envelhecimento celular precoce. Esses fatores podem ser de origem fisiológica, genética ou ambiental. Entre os fatores externos, destaca-se a radiação ultravioleta (UV) como um dos principais agentes indutores de danos ao DNA celular. (Ogrodnik, 2021) A principal fonte de radiação UV à qual os seres humanos estão expostos é o sol, embora certos tipos de lâmpadas artificiais também emitam esse tipo de radiação. A intensidade dos danos celulares induzidos pela radiação ultravioleta está diretamente relacionada à duração, frequência e intensidade da exposição, podendo afetar significativamente a integridade dos telômeros e acelerar o processo de senescência celular (Lundsgaard; Cramp; Franklin, 2022)

Os raios ultravioletas geram uma radiação chamada de ionizante que gera radicais livres, moléculas instáveis capazes de causar danos oxidativos ao DNA, incluindo as regiões teloméricas. A quantidade de radicais livres gerados é proporcional ao dano causado: enquanto níveis baixos de radicais livres podem ser neutralizados pelo sistema antioxidante do organismo, concentrações elevadas podem ultrapassar a capacidade de defesa celular e acelerar o processo de envelhecimento por meio da redução acelerada dos telômeros (Juchem *et al.*, 2001)

O sistema antioxidante do organismo humano é composto por mecanismos enzimáticos e não enzimáticos que atuam na neutralização dos radicais livres, protegendo as células contra o estresse oxidativo. Enzimas como superóxido dismutase, catalase e glutatona peroxidase desempenham papel essencial nesse processo, assim como compostos não enzimáticos, como as vitaminas A, C e os carotenoides. A produção de radicais livres é natural, mas pode ser intensificada por fatores como radiação, poluição, má alimentação e estresse. Quando em excesso,

essas espécies reativas comprometem a integridade celular, favorecendo o envelhecimento precoce e o desenvolvimento de doenças. Manter um sistema antioxidante eficiente, por meio de uma alimentação equilibrada e hábitos saudáveis, é fundamental para preservar a saúde e a longevidade (Balaban; Nemoto; Finkel, 2005)

Este trabalho tem como objetivo explorar a relação entre a radiação e os danos ao material genético e como isso pode gerar o encurtamento dos telômeros, destacando os mecanismos biológicos envolvidos e as consequências para a saúde humana. Compreender como esses processos estão interligados é essencial para comunidade científica no desenvolvimento de estratégias proteção celular e de intervenções que possam mitigar os efeitos do envelhecimento precoce induzido por danos ao DNA, e para que a população possa compreender a importância de doses diárias adequadas e seguras de exposição ao sol. De acordo com o Ministério da Saúde o câncer de pele é o tipo de câncer mais frequente no Brasil, o estudo e desenvolvimento de compostos fotoprotetores é o início da prevenção contra o câncer de pele.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Envelhecimento celular e seus fatores

O envelhecimento celular é um processo complexo influenciado por diversos fatores, como uma alimentação inadequada, o consumo excessivo de álcool, a exposição à radiação solar e o acúmulo de radicais livres. Esses fatores contribuem para o comprometimento das células e aceleram o envelhecimento.

Dentre os principais mecanismos biológicos relacionados ao envelhecimento celular, destacam-se os radicais livres, que são moléculas instáveis capazes de causar danos às células. Além disso, o encurtamento dos telômeros, estruturas presentes nos cromossomos, é um marcador importante da idade celular. A cada divisão celular, os telômeros se encurtam, e esse processo acelerado pode levar à morte celular ou ao envelhecimento precoce. Outro fator relevante é o estresse oxidativo, que ocorre quando há um desequilíbrio no sistema antioxidante do organismo, resultando no acúmulo de radicais livres. Esse desequilíbrio contribui ainda mais para o dano celular e acelera o processo de envelhecimento. (Gromkowska-Kępa *et al.*, 2021; Ogrodnik, 2021)

Portanto, a combinação desses fatores e mecanismos, como o encurtamento dos telômeros e o aumento do estresse oxidativo, é determinante para o envelhecimento celular, e, quando acelerados, esses processos podem levar a um envelhecimento precoce das células e, conseqüentemente, do organismo como um todo (Ogrodnik, 2021).

2.2 Radiação e envelhecimento celular

As radiações ionizantes e não ionizantes impactam o envelhecimento celular de diferentes formas. A radiação ionizante: Causa a radiólise da água, resultando na formação de radicais livres e conseqüentemente um aumento na concentração dessas moléculas. Radiação Não Ionizante: Pode causar um desequilíbrio no sistema antioxidante, levando ao aumento dos radicais livres e ao estresse Oxidativo (Cadet *et al.*, 1997; Dondoladze *et al.*, 2022)

2.3 Radiação e seus tipos

A radiação é a emissão de energia por meio de ondas ou partículas. Existem dois tipos principais de radiação: Radiação Ionizante: Capaz de quebrar ligações químicas e remover elétrons dos átomos, podendo causar alterações celulares significativas. Radiação Não Ionizante: Não possui energia suficiente para remover elétrons, mas ainda pode interferir nos processos celulares. A radiação ultravioleta (UV) pode ser ionizante ou não ionizante, dependendo do seu comprimento de onda. Os efeitos da radiação nas células podem levar a danos no DNA e causar o envelhecimento precoce (Cadet *et al.*, 1997)

2.4 Consequências da exposição à radiação

A exposição prolongada à radiação pode resultar em alterações celulares e no desenvolvimento de patologias. Entre as manifestações mais comuns estão: manchas hipo pigmentadas ou hiper pigmentadas, Diminuição dos melanócitos e Ceratose Actínica. O impacto da radiação no envelhecimento celular é significativo, especialmente devido ao aumento do estresse oxidativo e da produção de radicais livres. O controle desses fatores por meio de antioxidantes e proteção solar pode ajudar a retardar o processo de envelhecimento e prevenir patologias cutâneas. (Lundsgaard; Cramp; Franklin, 2022).

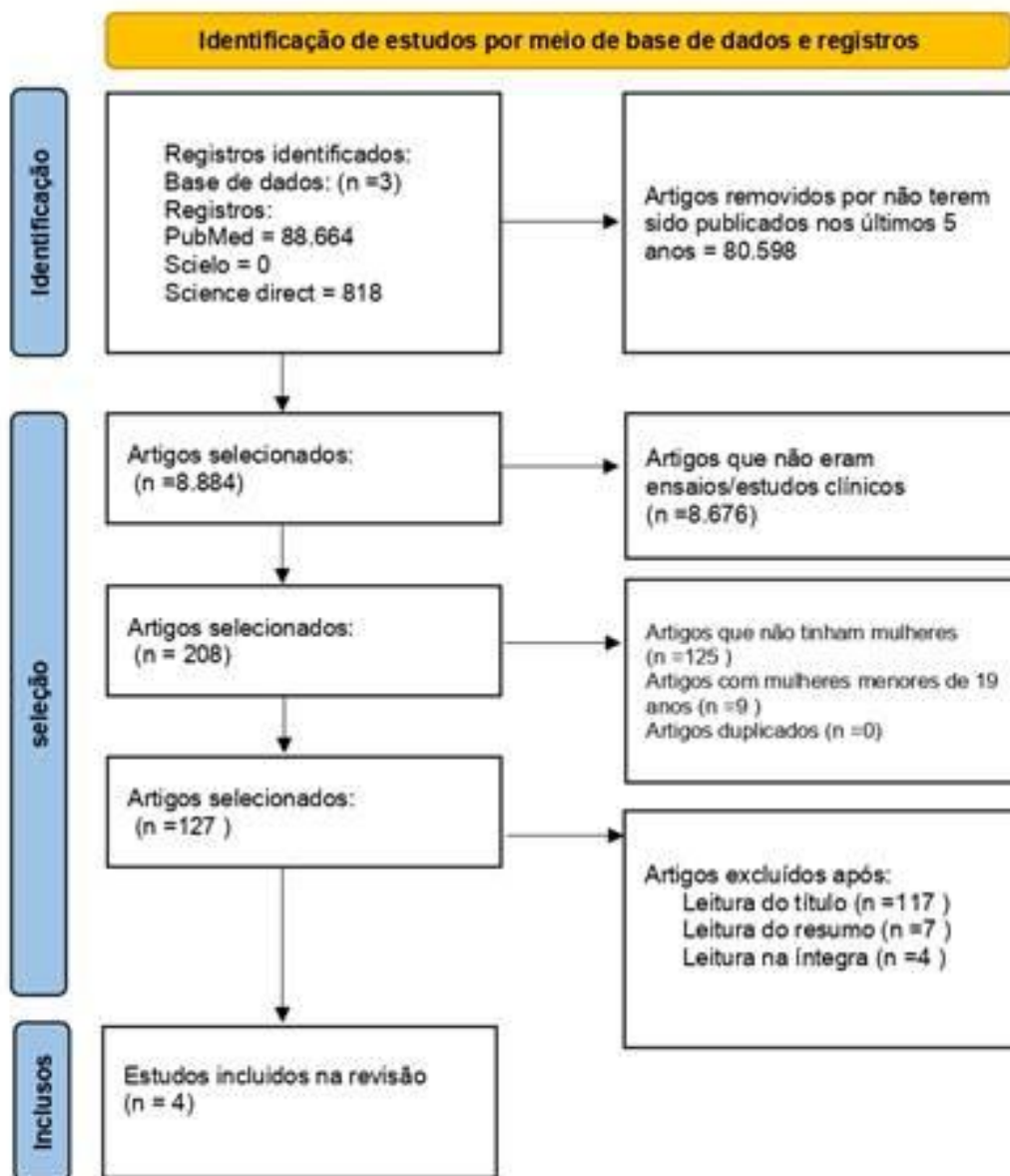
3 METODOLOGIA

O presente trabalho é uma revisão integrativa da literatura, composta por artigos de estudos clínicos nos idiomas inglês e português publicados nos últimos 5 anos na base de dados *U.S. National Library of Medicine* (PubMed), ScienceDirect e *Scientific Eletronic Library Online* (SciELO). A partir de buscas realizadas nos descritores de busca *MeSH terms* da *National Center of Biotechnology Information* (NCBI) e Descritores em Ciências da Saúde (DeCS), as palavras-chave que melhor descrevem o tema e foram utilizadas como estratégias de busca foram "genetic material" OR "DNA" AND "telomeres" AND "damage" OR "cellular aging" OR "cellular senescence" AND "Radiation UV" OR "ultraviolet rays", em inglês, e "material genético", "DNA", "telômeros", "danos", "envelhecimento celular", "senescencia celular", "Radiação UV" e "raios ultravioletas" em português, combinados com os operadores booleanos AND e OR nas bases da PubMed e SciELO, na base do ScienceDirect foi utilizada a seguinte estratégia de busca, "telomeres" and "cellular aging" and "ultraviolet rays", em português "telômeros" e "envelhecimento celular" e "raios ultra violetas" .

Os critérios de inclusão para a seleção dos artigos, a partir da leitura dos resumos e na íntegra, foram que apresentem estudos sobre danos ao DNA causados pela radiação UVA, encurtamento dos telômeros causado por danos ao DNA, envelhecimento celular precoce, estruturas celulares e relação dos danos ao DNA com envelhecimento. Artigos que não contenham seleção de dados originais, como revisões de literatura, relatos de caso, nota técnica, editorial e estudos que correlacionem melanomas causados pela radiação UV, transdução de informações do DNA, erros genéticos no DNA que levam ao envelhecimento celular, foram excluídos durante a busca bibliográfica.

Inicialmente, a seleção dos artigos foi realizada por meio de pesquisas nas bases de dados, aplicação de filtros de busca, leitura do título. Nos textos selecionados que se enquadraram nos critérios de inclusão preestabelecidos foi realizada uma leitura na íntegra. Os artigos que não se encaixaram no delineamento da pesquisa, foram excluídos. A partir da leitura dos textos elegíveis, foi realizada uma análise qualitativa dos dados apresentados para a obtenção dos resultados (Figura 1).

Figura 1. Fluxograma de estratégias de buscas



Fonte: adaptado de PRISMA (2020).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram selecionados quatro estudos no total, um ensaio cometa, um estudo de coorte, um ensaio piloto duplo-cego e um ensaio clínico randomizado. Dois desses estudos foram realizados no Brasil, um nos Estados Unidos e outro na Coreia do Sul. Os estudos mostram principalmente as relações entre estilo de vida, atividades ocupacionais e estratégias de prevenção e tratamento dos danos induzidos pela radiação UV no DNA.

Os telômeros são estruturas localizadas nos cromossomos que tem como sua principal função a proteção dos desgastes do nosso material genético, em resposta ao estresse oxidativo e ao ciclo de divisão celular os telômeros vão progressivamente diminuindo, e ao atingirem determinado tamanho induzem a apoptose celular, funcionando como um marcador biológico da vida útil da célula (Souza et al., 2020).

A radiação ultravioleta (UVA e UVB) está amplamente associada a danos celulares, incluindo reações fototóxicas que promovem a oxidação de componentes celulares e podem resultar em envelhecimento precoce e no desenvolvimento de câncer de pele. Além disso, a radiação UV reduz a produção de energia celular e compromete a capacidade de manutenção da viabilidade e funcionalidade das células (Herrera et al., 2025). Determinados comprimentos de ondas os raios UV conseguem penetrar profundamente na pele e gerar espécies radioativas de oxigênio., que levam ao estresse oxidativo gerando danos no DNA e conseqüentemente mutações no material genético (McCormick et al., 2024).

Após a exposição à radiação UV as principais respostas cutâneas imediatas são eritema (avermelhamento da pele) e edema (inchaço local); em análises histológicas onde a exposição é frequente observa-se presença de infiltrado inflamatório e alterações estruturais associadas à radiação UV-A; a nível molecular avaliados em testes como PCR (reação em cadeia da polimerase) pode ocorrer fragmentação de DNA; mutagênese induzida por ROS e danos específicos em regiões codificantes e não codificantes do genoma (McCormick et al., 2024). Diante dessa constante exposição, torna-se fundamental compreender os mecanismos envolvidos na resposta cutânea à radiação, a fim de avaliar de forma mais precisa seus impactos sobre a saúde (Herrera et al., 2025).

Os protetores solares representam a principal estratégia de fotoproteção, nesse contexto com o uso de protetores, uso de substâncias antioxidante e anti-inflamatórias

é possível observar a redução significativa de lesões no DNA nuclear e mitocondrial e considerando que o dano ao DNA é um evento central na carcinogênese cutânea (McCormick et al., 2024); é preciso que estudos sejam desenvolvidos para a melhor ação desses compostos fotoprotetores como mecanismo de prevenção.

Quando falamos de material genético a manutenção adequada do comprimento dos telômeros é, crucial para a homeostase celular e tecidual. Alterações nos telômeros têm sido associadas ao envelhecimento precoce, doenças cardiovasculares, metabólicas, neurodegenerativas e câncer (Souza et al., 2020).

A longitude dos telômeros é medida em pares de base, que correspondem aos pares de nucleotídeos opostos e complementares ligados na cadeia de DNA, sendo que a quilobase é a unidade de medida utilizada para representar mil desses pares. Em 2009, os pesquisadores Elizabeth Blackburn, Carol Greider e Jack Szostak receberam o Prêmio Nobel de Medicina por seus estudos sobre o envelhecimento celular e sua relação com o câncer. Eles descobriram que a enzima telomerase desempenha um papel fundamental na proteção dos cromossomos contra o envelhecimento, pois é capaz de regenerar os telômeros, evitando seu encurtamento durante as divisões celulares e contribuindo, assim, para a manutenção da juventude biológica das células (BBC News Brasil, 2018).

A vitamina D é um hormônio esteroide cuja principal função está relacionada à regulação do metabolismo ósseo, sendo produzida a partir da exposição solar. Diversos estudos têm evidenciado uma deficiência dessa vitamina em proporções epidêmicas em várias regiões do mundo, associando-se a múltiplos agravos à saúde. Além de comprometer o metabolismo ósseo, a carência de vitamina D está relacionada ao aumento do risco de desenvolvimento de diversas condições, como doenças cardiovasculares, alguns tipos de câncer, déficits cognitivos, doenças autoimunes e alergias (Galvão et al., 2013).

Apesar dos avanços no entendimento do papel dos telômeros na resposta celular ao estresse e aos danos ao DNA, sua importância relativa frente a outros fatores, bem como as interações entre proteínas e vias de sinalização que os influenciam direta ou indiretamente, ainda não está completamente elucidada, mas sem dúvida o futuro da pesquisa sobre telômeros é promissor indicando a necessidade de investigações mais aprofundadas (Laboratory et al., 2008).

As pesquisas demonstram que a radiação ultravioleta provoca danos precoces ao material genético, podendo levar ao desenvolvimento de doenças associadas a

distúrbios celulares (McCormick et al., 2024; Souza et al., 2020), mas os estudos não relacionam como essa radiação pode interferir diretamente nos telômeros, como a telomerase pode ser uma aliada na prevenção de doenças, como câncer de pele causado principalmente pela radiação UV (Hospital Israelita Albert Einstein., 2025) e qual a ação dos compostos fotoprotetores para reduzir danos ao material genético. Pesquisas sobre como os danos causados pelos raios ultravioletas atingem negativamente o material genético e principalmente os telômeros, por induzir o ciclo celular, ainda são escassas, apesar do âmbito de pesquisas que façam testes moleculares vir se desenvolvendo.

Tabela 1. Compilado de estudos selecionados sobre...

Autor	País	Tipo de estudo	Objetivo principal	n amostral	Características da amostra	Método	Principais resultados
Souza et al. 2020	Brasil	Ensaio cometa	O objetivo desse estudo foi avaliar os polimorfismos nos mecanismos de reparo do DNA em trabalhadores de minas de carvão a céu aberto.	70 expostos ao carvão (grupo exposto) e 71 que não foram expostos ao carvão (grupo de controle). Total de 141 indivíduos.	Indivíduos maiores de 18 anos sem nenhuma patologia crônica prévia.	Foram coletadas amostras de DNA dos participantes e realizados diferentes testes para os tipos de polimorfismos.	Foi observado pelo estudo que os polimorfismos em genes específicos podem modular a suscetibilidade a danos no DNA causados pela exposição ao carvão.
Normando et al. 2019	Brasil	Estudo de coorte prospectivo	O objetivo desse estudo foi avaliar a relação entre os polimorfismos em genes da vitamina D e sua concentração sérica.	461 participantes	Indivíduos de 50 a 30 anos selecionados por entrevistas que incluem dados socioeconômicos, composição corporal e genéticas.	Foram coletadas amostras de DNA leucocitários dos participantes para análise dos genótipos relacionados a vitamina D.	A variação dos genes que codificam as proteínas de ligação da vitamina D influenciam
McCormick et al. 2024	Estados Unidos	Ensaio clínico piloto prospectivo duplo cego	Avaliar o potencial de fotoproteção dos Cannabidiol de forma tópica contra os marcadores pré-mutagênicos induzidos pela radiação UVB.	20 participantes	Indivíduos de 22 a 65 anos com fototipo de pele Fitzpatrick I a III.	Cada voluntário recebeu aplicações tópicas em áreas delimitadas da pele do dorso, divididas em três grupos: 1. CBD nanoencapsulado 2. placebo. 3. Controle sem aplicação. Após a aplicação, as áreas foram expostas a radiação UV-A em doses padronizadas.	O estudo observou que o creme tópico de Cannabidiol nanoencapsulado exerce efeitos protetores significativos contra os danos induzidos pela radiação UV-A em pele humana principalmente na redução clínica de eritema, edema e pigmentação residual, preservação da estrutura epidérmica e na proteção do DNA nuclear e mitocondrial

Mo et al. 2025	Coreia do Sul	Ensaio clínico randomizado	Avaliar como a exposição controlada a radiação UV influencia a síntese de vitamina D.	24 participantes	Indivíduos de 19 a 65 anos sem histórico de doenças hepáticas, renais, dermatites ou gestação.	Os voluntários foram submetidos a sessões controladas de exposição à radiação UV em cabine especialmente calibrada para emitir radiação UVB.	Foi observado que a radiação UV controlada promove a síntese de vitamina D e influencia positivamente o metabolismo de eletrólitos (cálcio e fosforo).
-------------------	---------------	----------------------------	---	------------------	--	--	--

UV: ultravioleta; UVB: raios ultravioletas B; UVA: raios ultravioletas A; CBD: Cannabidiol

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As evidências reunidas neste estudo demonstram que a radiação ultravioleta exerce papel central no desencadeamento de danos ao DNA celular, intensificando o estresse oxidativo, acelerando o encurtamento dos telômeros e contribuindo para o envelhecimento precoce e para o desenvolvimento de patologias cutâneas. A análise dos estudos selecionados evidencia que fatores ambientais, especialmente a exposição solar inadequada, influenciam diretamente a integridade do material genético e a capacidade proliferativa celular, reforçando a importância dos telômeros como marcadores biológicos da longevidade e da saúde celular.

Embora haja avanços na compreensão dos mecanismos pelos quais a radiação UV altera o DNA, ainda existe uma lacuna significativa no entendimento da sua relação direta com o desgaste telomérico e com a atuação da telomerase frente ao estresse genotóxico. Nesse contexto, tornam-se urgentes novas investigações que aprofundem a interface entre radiação UV, telômeros, telomerase e processos de carcinogênese.

Além disso, os dados analisados destacam a relevância de estratégias fotoprotetoras, incluindo protetores solares e compostos antioxidantes, como medidas fundamentais para reduzir danos moleculares e prevenir doenças associadas à exposição solar. Assim, este trabalho reforça a necessidade de ações educativas, políticas de saúde pública e pesquisas inovadoras que possibilitem o desenvolvimento de intervenções mais eficazes para a proteção do DNA e a promoção do envelhecimento saudável.

REFERÊNCIAS

FONSECA, A. P. et al. Benefits of a multifunctional sunscreen formulation containing nanoencapsulated antioxidants in the skin protection against UV radiation and blue light: clinical and preclinical studies. **Journal of Cosmetic Dermatology**, v. 24, e70282, 2025.

FONTES, W. et al. Um ensaio clínico piloto para explorar os efeitos da exposição aos raios UV na estabilidade dos telômeros de leucócitos humanos. **Anais Brasileiros de Dermatologia**, v. 88, n. 1, p. 62-66, 2013.

MCCORMICK, E. et al. Topical nanoencapsulated cannabidiol cream as an innovative strategy combating UV-A–induced nuclear and mitochondrial DNA injury: a pilot randomized clinical study. **Journal of the American Academy of Dermatology**, v. 91, p. 855-862, 2024.

NORMANDO, P. et al. Variants in gene encoding for vitamin D binding protein were associated with leukocyte telomere length: **The Pró-Saúde Study. Nutrition**, v. 71, p. 110618, 2020.

PENG, X. et al. Triagem e preparação de peptídeos antioxidantes a partir de hidrolisados proteicos: uma revisão. **Food Chemistry**, v. 165, p. 200-207, 2014.

SOUZA, M. R. de et al. The influence of polymorphisms of xenobiotic-metabolizing and DNA repair genes in DNA damage, telomere length and global DNA methylation evaluated in open-cast coal mining workers. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 189, p. 109975, 2020.

TOUTI, R.; RENOUX, P.; NOCAIRI, H.; DOUEZAN, S.; PASSERON, T.; JOSSO, M. Standardized in vivo method using high-resolution diffuse reflectance spectroscopy for evaluating sunscreen effectiveness against ultraviolet A and high-energy visible light. **Photodermatology, Photoimmunology & Photomedicine**, v. 41, e70044, 2025.

ZHAO, J. et al. Protective effects of extracellular proteins extracted from *Saccharomyces fibuligera* on UVA-induced skin aging. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 318, p. 145315, 2025.

BBC NEWS BRASIL. O que são os telômeros, a chave do envelhecimento estudada pelos cientistas. **BBC News Brasil**, 3 abr. 2018. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/geral-43601735>>. Acesso em: 8 nov. 2025.

CLARK, Mary Ann; DOUGLAS, Matthew; CHOI, Jung. 14.5 DNA replication in eukaryotes. *Biology 2e*. Houston: **OpenStax**, 2018. Disponível em: <<https://openstax.org/books/biology/pages/14-5-dna-replication-in-eukaryotes>>. Acesso em: 8 nov. 2025.

GALVÃO, L. O. et al. Considerações atuais sobre a vitamina D. **Brasília Médica**, v. 50, n. 4, p. 324-332, 2013. Disponível em: <<https://rbm.org.br/details/113/pt-BR/consideracoes-atuais-sobre-a-vitamina-d>>. Acesso em: 17 nov. 2025.

HOSPITAL ALEMÃO OSWALDO CRUZ. 15 minutos de sol no seu dia podem melhorar sua saúde. São Paulo, 3 nov. 2022. Disponível em: <<https://www.hospitaloswaldocruz.org.br/imprensa/hospital-na-midia/15-minutos-de-sol-no-seu-dia-podem-melhorar-sua-saude/>>. Acesso em: 13 nov. 2025.

LI, P.; ZHU, J.; WANG, S. et al. Decoding disease-specific ageing mechanisms through pathway-level epigenetic clock: insights from multi-cohort validation. **eBioMedicine**, v. 118, p. 105829, 2025.

TANG, P.-X.; LI, J.-X.; GUO, C. et al. A novel polypeptide inhibitor of MMP-1 attenuates the UVA-mediated skin aging. **Biochemical and Biophysical Research Communications**, 2025.

BALABAN, R. S.; NEMOTO, S.; FINKEL, T. Mitochondria, oxidants, and aging. *Cell*, v. 120, n. 4, p. 483-495, 2005.

CADET, J.; BERGER, M.; DOUKI, T.; MORIN, B.; RAOUL, S.; RAVANAT, J. L.; SPINELLI, S. Effects of UV and visible radiation on DNA – final base damage. **Biological Chemistry**, v. 378, n. 11, 1997.

DONDOLADZE, K.; NIKOLAISHVILI, M.; MUSELIANI, T.; JIKIA, G. Effect of radiation on aging processes and telomere length. **Problemy Radiatsiinoi Medytsyny ta Radiobiologii**, v. 27, p. 107-119, 2022.

GROMKOWSKA-KĘPKA, K. J.; PUŚCION-JAKUBIK, A.; MARKIEWICZ-ŻUKOWSKA, R.; SOCHA, K. The impact of ultraviolet radiation on skin photoaging — review of in vitro studies. *Journal of Cosmetic Dermatology*, v. 20, n. 11, p. 3427-3431, 2021.

JUCHEM, P.; HOCHBERG, J.; WINOGRON, A.; ARDENGHY, M.; ENGLISH, R. Riscos à saúde da radiação ultravioleta. **Revista Brasileira de Cirurgia Plástica**, v. 13, n. 2, p. 31-60, [s.d.]. Disponível em: <<https://www.rbc.org.br/details/238/pt-BR/riscos-a-saude-da-radiacao-ultravioleta>>. Acesso em: 1 maio 2025.

LUNDSGAARD, N. U.; CRAMP, R. L.; FRANKLIN, C. E. Early exposure to UV radiation causes telomere shortening and poorer condition later in life. **Journal of Experimental Biology**, v. 225, n. 17, 2022a.

LUNDSGAARD, N. U.; CRAMP, R. L.; FRANKLIN, C. E. Early exposure to UV radiation causes telomere shortening and poorer condition later in life. **Journal of Experimental Biology**, v. 225, n. 17, 2022b.

OGRODNIK, M. Cellular aging beyond cellular senescence: markers of senescence prior to cell cycle arrest in vitro and in vivo. *Aging Cell*, v. 20, n. 4, 2021.

SMITH, E. M.; PENDLEBURY, D. F.; NANDAKUMAR, J. Structural biology of telomeres and telomerase. **Cellular and Molecular Life Sciences**, v. 77, n. 1, p. 61-79, 2020.