



Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Biociências

JAIRO ÉRICK DE LIMA VASCONCELOS

**PERFIL ELETROFORÉTICO DE PROTEÍNAS SÉRICAS DE
INDIVÍDUOS EXPOSTOS À RADIAÇÃO IONIZANTE**

Recife
2025

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

Vasconcelos, Jairo Érick de Lima.

PERFIL ELETROFORÉTICO DE PROTEÍNAS SÉRICAS DE INDIVÍDUOS
EXPOSTOS À RADIAÇÃO IONIZANTE / Jairo Érick de Lima Vasconcelos. -
Recife, 2025.

39p. : il., tab.

Orientador(a): Thiago de Salazar e Fernandes

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Biociências, Biomedicina, 2025.

Inclui referências, apêndices, anexos.

1. Perfil eletroforético de proteínas séricas. 2. Exposição à radiação Ionizante.
3. Biomarcadores. 4. Oxidação. 5. Inflamação. 6. Identificação de danos. I.
Fernandes, Thiago de Salazar e . (Orientação). II. Título.

010 CDD (22.ed.)

JAIRO ÉRICK DE LIMA VASCONCELOS

**PERFIL ELETROFORÉTICO DE PROTEÍNAS SÉRICAS DE
INDIVÍDUO EXPOSTOS À RADIAÇÃO IONIZANTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Biomedicina da Universidade Federal de Pernambuco, como pré-requisito à obtenção do título de Bacharel em Biomedicina.

Orientador: Prof. Dr. Thiago de Salazar e Fernandes

Recife
2025

JAIRO ÉRICK DE LIMA VASCONCELOS

**PERFIL ELETROFORÉTICO DE PROTEÍNAS SÉRICAS DE
INDIVÍDUOS EXPOSTOS À RADIAÇÃO IONIZANTE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação
em Biomedicina da Universidade
Federal de Pernambuco, como pré-
requisito à obtenção do título de
Bacharel em Biomedicina.

Aprovada em: ___/___/___

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Thiago de Salazar e Fernandes
UFPE/ Depto de Biofísica e Radiobiologia

Profa. Dra. Dijanah Cota Machado
UFPE/ Depto de Biofísica e Radiobiologia

Profa. Dra. Isvânia Maria Serafim da Silva Lopes
UFPE/ Depto de Biofísica e Radiobiologia

Dedico este trabalho à minha família:
minha avó, meu pai, minha mãe e
minha irmã.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Thiago de Salazar e Fernandes, por me guiar com paciência e sabedoria, pelos ensinamentos durante as aulas e os anos de monitoria e por transparecer o quanto a biofísica é linda e fascinante. Um professor excepcional que sempre demonstrou disponibilidade e solícito aos seus alunos.

Aos professores da cadeira de Física e Biofísica 1 e ao departamento de Biofísica e Radiobiologia, pelas excelentes aulas, pelos grandes ensinamentos durante minha época de monitor e por me fazerem me encantar com a área.

A toda minha família, por serem minha fortaleza. A minha vó Zezinha por sempre cuidar muito bem de mim, pelas histórias que conta, por sempre me receber em casa com muita felicidade e por ser um exemplo de resiliência. Ao meu pai Jairo, cujo nome eu herdei, por demonstrar que nessa vida temos que ser fortes perante as adversidades, por todos os ensinamentos que me guiaram para a pessoa que sou hoje e por ser alguém com quem posso contar sempre. A minha mãe Diana por ser protetora, a melhor mãe coruja do mundo, sempre fez questão de estar presente em vários momentos da minha vida e por me ensinar a ser alguém que pense grande. A minha irmã Mayara, com quem discuto e me divirto muito, a sua chegada na minha vida foi uma benção de Deus, para sempre vai ser minha pirraia. Amo todos vocês infinitamente.

Aos meus amigos de graduação, Adriany, Ariadne, Filipe, Lucas, Manoella, Miguel e Walter, por aguentarem minha chatice durante esses anos, pelas risadas compartilhadas, pelos momentos de estudo em grupo, por todas as vezes que almoçamos juntos, principalmente pelas conversas pós-almoço e por demonstrarem que realmente queriam ser meus amigos, essa não é uma tarefa muito fácil.

Aos meus amigos da época de escola. Danilo, o autointitulado ser humano mais honrado da terra. Elias, meu colega de quarto nos últimos anos, com quem compartilhei muitos dias de felicidade e também dificuldade. João Lucas, o irmão que a vida me deu, sempre me incentivando a ser persistente nos meus objetivos por acreditar que eu era capaz, muitas vezes mais do que eu mesmo e por jogar lol comigo mesmo sem gostar do jogo.

Também gostaria de agradecer as outras pessoas que fizeram parte dessa minha caminhada, colegas de curso, colegas e preceptores do estágio, todos

os meus professores, todos os meus familiares e conterrâneos próximos, pois de alguma forma ou outra foram parte essencial do meu desenvolvimento durante a graduação.

VASCONCELOS, Jairo Érick de Lima Vasconcelos. **PERFIL ELETROFORÉTICO DE PROTEÍNAS SÉRICAS DE INDIVÍDUOS EXPOSTOS À RADIAÇÃO IONIZANTE.** 2025. 39 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Biomedicina) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2025.

RESUMO

A radiação ionizante, seja proveniente de fontes naturais (terrestres ou cósmicas) ou artificiais, é capaz de causar diversos danos biológicos, afetando principalmente a estrutura do DNA, com a geração de espécies reativas de oxigênio (ROS) e induzindo processos inflamatórios. Esses efeitos podem comprometer órgãos vitais, como o fígado, pulmões e sistema imunológico. A eletroforese de proteínas séricas é uma técnica importante para avaliar as alterações no perfil proteico do sangue, possibilitando a identificação de distúrbios causados pela exposição à radiação. Este trabalho tem como objetivo definir o perfil eletroforético de proteínas séricas de indivíduos expostos à radiação ionizante, através de uma revisão bibliográfica narrativa. Para tanto, foi realizada uma análise dos principais estudos publicados sobre o tema, com foco nas alterações nas frações proteicas e na influência de variáveis como o tempo pós-exposição, a dose de radiação e a gravidade da lesão. A revisão envolveu a busca por artigos nas bases de dados PubMed e Scielo, utilizando descritores como "Ionizing radiation AND Human serum proteins" e "Radiation AND Electrophoretic profile". Após a aplicação dos critérios de seleção, foram escolhidos oito artigos relevantes que formaram a base para esta análise. Entre os principais achados, observou-se que a exposição à radiação ionizante provoca alterações nas frações proteicas do soro, com destaque para a albumina, alfa-1 e alfa-2 globulinas, e imunoglobulinas. A albumina, proteína sintetizada no fígado, apresentou diminuição nas primeiras horas após a exposição, indicando alterações hepáticas. As bandas alfa1 e alfa2, associadas a processos inflamatórios, mostraram aumento de proteínas de fase aguda, como a alfa-1-antitripsina e a haptoglobina. A alfa-2-macroglobulina e a transferrina, presentes na banda beta, também sofreram alterações, variando conforme a dose e o tempo de exposição. Já a banda gama, composta pelas imunoglobulinas, manteve relativa estabilidade, com elevação de IgA e IgM em contextos específicos de exposição ocupacional. Os resultados indicam que a eletroforese de proteínas séricas pode ser uma ferramenta útil no monitoramento de indivíduos expostos à radiação ionizante, permitindo a detecção de distúrbios hepáticos, inflamatórios e imunológicos. Contudo, os estudos revelam uma grande variabilidade nas respostas proteicas, o que sugere a necessidade de mais pesquisas para padronizar a técnica e entender melhor as influências da dose, do tipo de radiação e do tempo de exposição nas alterações do perfil eletroforético. Dessa forma, as proteínas séricas analisadas pela eletroforese poderiam se consolidar como biomarcadores valiosos na avaliação de lesões causadas pela radiação ionizante, com potencial para se tornar uma alternativa em relação às aberrações cromossômicas, o padrão ouro para identificar indivíduos que receberam danos devido à radiação.

Palavras-chave: Biomarcadores. Inflamação. Exposição. Análise proteica. Oxidação.

VASCONCELOS, Jairo Érick de Lima. "ELECTROPHORETIC PROFILE OF SERUM PROTEINS IN INDIVIDUALS EXPOSED TO IONIZING RADIATION". 2025. 39 pages. Course Completion Work (Graduation in Biomedicine) – Federal University of Pernambuco, Recife, 2025.

ABSTRACT

Ionizing radiation, whether from natural (terrestrial or cosmic) or artificial sources, can cause various biological damages, primarily affecting DNA structure by generating reactive oxygen species (ROS) and inducing inflammatory processes. These effects can compromise vital organs such as the liver, lungs, and immune system. Serum protein electrophoresis is an important technique for evaluating alterations in blood protein profiles, enabling the identification of disturbances caused by radiation exposure. This study aims to define the electrophoretic profile of serum proteins in individuals exposed to ionizing radiation through a narrative bibliographic review. To this end, an analysis of key studies on the subject was conducted, focusing on changes in protein fractions and the influence of variables such as post-exposure time, radiation dose, and the severity of the lesion. The review involved searching for articles in PubMed and Scielo databases, using descriptors such as "Ionizing radiation AND Human serum proteins" and "Radiation AND Electrophoretic profile". After applying selection criteria, eight relevant articles were chosen for analysis. Among the key findings, it was observed that exposure to ionizing radiation causes alterations in serum protein fractions, with particular emphasis on albumin, alpha-1 and alpha-2 globulins, and immunoglobulins. Albumin, a liver-synthesized protein, showed decreased levels in the first hours after exposure, indicating hepatic changes. Alpha-1 and alpha-2 bands, associated with inflammatory processes, exhibited increased levels of acute-phase proteins such as alpha-1-antitrypsin and haptoglobin. Alpha-2-macroglobulin and transferrin in the beta band also showed changes, varying according to the dose and exposure time. Finally, the gamma band, composed of immunoglobulins, maintained relative stability, with IgA and IgM elevations in specific occupational exposure contexts. The results indicate that serum protein electrophoresis can be a useful tool for monitoring individuals exposed to ionizing radiation, allowing the detection of hepatic, inflammatory, and immunological disturbances. However, the studies reveal significant variability in protein responses, suggesting the need for further research to standardize the technique and better understand the influence of dose, radiation type, and exposure time on the alterations in the electrophoretic profile. Thus, serum proteins analyzed by electrophoresis could become valuable biomarkers in the evaluation of injuries caused by ionizing radiation, with the potential to become an alternative to chromosomal aberrations, the gold standard for identifying individuals who have suffered damage due to radiation.

Key words: Biomarkers. Inflammation. Exposure. Protein analysis. Oxidation

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Tipos de radiação ionizante.	15
Figura 2- Raios C3smicos Gal3cticos e Part3culas Energ3ticas Solares.	16
Figura 3- Cintur3es de Van Allen.	16
Figura 4- Mecanismos de dano celular pela radia33o.	17
Figura 5- Bandas da eletroforese de prote3nas s3ricas.	20
Figura 6- Gel de agarose.	21
Figura 7- SDS-PAGE.	21
Figura 8- Eletroforese capilar.	22
Figura 9- Gamopatia Monoclonal.	23
Figura 10- Fluxograma de sele33o dos artigos utilizados no estudo.	25
Quadro 1- Resumos dos resultados e principais informa33es.	26
Figura 11- Perfil eletrofor3tico da albumina da regi3o card3aca de ratos irradiados.	27
Figura 12- Perfil eletrofor3tico da banda alfa-1 do soro da regi3o card3aca de ratos irradiados.	28
Figura 13- Perfil eletrofor3tico da banda alfa-2 do soro da regi3o card3aca de ratos irradiados.	30
Figura 14- Perfil eletrofor3tico da banda beta do soro da regi3o card3aca de ratos irradiados.	31
Figura 15- Perfil eletrofor3tico da banda gama do soro da regi3o card3aca de ratos irradiados.	32
Figura 16- Perfil eletrofor3tico de prote3nas s3ricas da regi3o card3aca de ratos irradiados.	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BER	Reparo por Excisão de Base
DAMP	Padrões Moleculares Associados a Danos
NER	Reparo por Excisão de Nucleotídeos
PCR	Proteína C Reativa
SAA	Amiloide A Sérico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1	INTRODUÇÃO À RADIAÇÃO IONIZANTE	15
2.1.1	Tipos de radiação ionizante.....	15
2.1.2	Fontes naturais e artificiais de radiação	16
2.1.3	Unidades de medida de radiação	17
2.1.4	Mecanismos de interação da radiação com a matéria biológica	17
2.2	EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO IONIZANTE.....	18
2.2.1	Danos ao DNA e reparo celular	18
2.2.2	Efeitos agudos e crônicos da exposição	18
2.2.3	Resposta inflamatória e estresse oxidativo	18
2.2.4	Alterações hematológicas e imunológicas em expostos	18
2.2.5	Aberrações cromossômicas instáveis	18
2.3	PROTEÍNAS SÉRICAS.....	19
2.3.1	Origem e função das proteínas séricas	19
2.3.2	Principais frações proteicas.....	19
2.3.3	Fatores que alteram o perfil proteico	20
2.3.4	Biomarcadores séricos de dano tecidual e inflamação.....	20
2.4	ELETROFORESE DE PROTEÍNAS SÉRICAS.....	20
2.4.1	Fundamentos da técnica de eletroforese.....	20
2.4.2	Tipos de eletroforese	21
2.4.3	Interpretação dos padrões eletroforéticos	22
2.4.4	Aplicações clínicas e laboratoriais.....	22
3	OBJETIVOS.....	24
3.1	OBJETIVO GERAL.....	24
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	24
4	METODOLOGIA	25
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
5.1	OBTENÇÃO DE DADOS	26
5.2	ALBUMINA	27
5.3	ALPHA-1	28
5.4	ALPHA-2	29

5.5	BETA	30
5.6	GAMA	31
5.7	PROTEÍNAS SÉRICAS E OS RAIOS CÓSMICOS	33
5.8	PERSPECTIVAS	34
6	CONCLUSÃO	35
	REFERÊNCIAS	37

1 Introdução

De acordo com a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) do Brasil, um acidente nuclear é quando há um desvio inesperado e significativo das condições normais de operação de uma instalação nuclear, que possa resultar em danos à propriedade, ao meio ambiente ou em exposições de trabalhadores e do público acima dos limites estabelecidos (Romano; Rogério, 2021).

Dentre os acidentes nucleares existentes é válido destacar o acidente de Chernobyl, que ocorreu devido a problemas técnicos no reator da usina nuclear e fez com que o núcleo do reator aquecesse e explodisse, isso acarretou na liberação de uma nuvem radioativa na região e, como consequência, estima-se que entre 4 mil e 90 mil das pessoas expostas foram à óbito (De Almeida; Catarina, 2023). Outro acidente que ocorreu foi o da cidade de Fukushima, ocorrido no dia 11 de março de 2011, um terremoto de magnitude 9 acometeu a costa leste do Japão, uma das suas principais consequências foi afetar a capacidade de resfriamento do núcleo da usina nuclear de Fukushima Daiichi, o que causou danos ao núcleo do reator e acarretou em um acidente nuclear que liberou radionuclídeos após as explosões, afetando principalmente os trabalhadores da usina (OMS; 2016).

Outra ocasião em que há seres humanos sendo expostos à radiação ionizante são nas viagens espaciais, uma vez que, há três principais fontes: raios cósmicos galácticos, provindos de fora do sistema solar geralmente gerados por explosões de supernovas, eventos solares, como ejeções de massa coronal que são muitas vezes imprevisíveis e os cinturões de Van Allen, que são faixas de partículas carregadas presas ao campo magnético da Terra (National Research Council; 2006).

Sendo assim, é válido ressaltar que a radiação ionizante pode causar danos celulares em sistemas biológicos, podendo causar diretamente ou indiretamente danos celulares. De forma direta ela carrega energia suficiente para remover elétrons dos átomos, enquanto de forma indireta, através da radiólise da água, são geradas espécies reativas de oxigênio que são altamente nocivas às moléculas. Devido a esses dois mecanismos é gerada uma instabilidade nas moléculas afetadas, principalmente na molécula do DNA, que pode acarretar quebra de fita única, quebra da dupla fita ou até mesmo danos nas bases nitrogenadas e no açúcar presentes na sua estrutura, o que induz a célula a iniciar vias de reparo ou sofrer morte celular (Saini; Sarabi *et al.*, 2025).

Dado isso, é válido ressaltar que indivíduos expostos a radiação ionizante podem ser afetados em qualquer parte de seu organismo, o que comumente desencadeia reações inflamatórias, uma vez que, doses acima de 1 Gy causam necrose celular e conseqüentemente ocorre a liberação de DAMPs, responsáveis pela estimulação de células T e células dendríticas que irão liberar citocinas pró-inflamatórias (Yahyapour; Rasoul *et al.*, 2018), além disso, a radiação ionizante pode causar lesões em diversos órgãos, como o fígado (Sun; Qing, 2018), principal produtor da albumina, que pode ser analisada através da técnica de eletroforese do soro do indivíduo, assim como também verificar a inflamação através das proteínas de fase aguda (Silva; Roberta *et al.*, 2008).

Em relação a eletroforese de proteínas séricas, ela é uma técnica bastante utilizada para auxiliar no diagnóstico e monitorar doenças, uma vez que, nela podemos observar 5 bandas (albumina, alfa-1, alfa-2, beta e gama), que mudam sua quantidade de acordo com o quadro do paciente, originadas pela separação das proteínas presentes no soro humano, através de forças eletroforéticas e eletroosmóticas. Por exemplo, em indivíduos com cirrose hepática podemos observar uma diminuição na fração albumina e uma ponta beta/gama, devido a produção aumentada de anticorpos policlonais, enquanto em processos inflamatórios e imunes as bandas alfa-1 e alfa-2 tendem a aumentar devido à presença nelas de proteínas de fase aguda positiva (Silva *et al.*, 2008).

Dado isso, estudar a correlação entre pacientes expostos à radiação ionizante e a eletroforese de proteínas séricas para detecção dos possíveis danos causados nessas pessoas é de grande importância, pois, possibilitaria entender como está a condição sistêmica do indivíduo, através de uma técnica simples, barata e prática.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

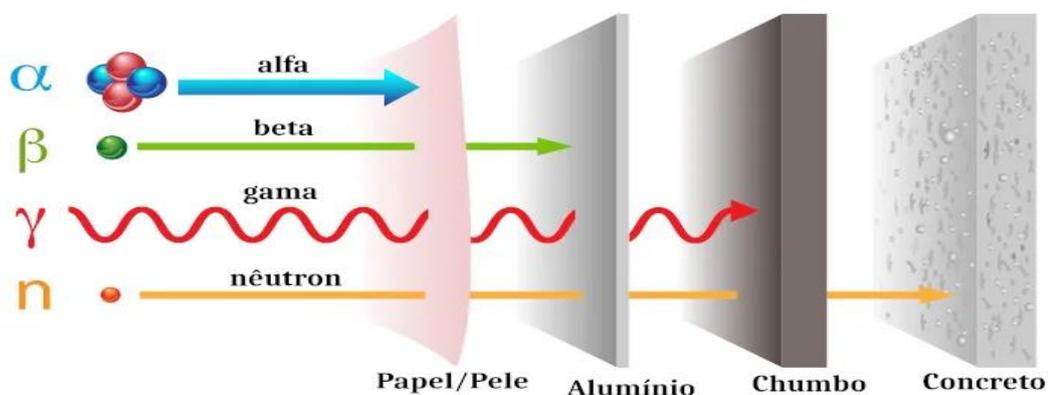
2.1 INTRODUÇÃO À RADIAÇÃO IONIZANTE

2.1.1 Tipos de radiação ionizante

Para compreender melhor como a radiação ionizante causa danos ao sistema biológica, é importante entender sua definição, que são moléculas ou raios eletromagnéticos que tem a capacidade de transportar energia suficiente para remover elétrons de átomos que compõe moléculas, criando íons. Os principais tipos incluem (Figura 1):

- Partículas Alfa (α): Constituídas por dois prótons e dois nêutrons, possuem alta massa e carga dupla positiva, porém baixo poder de penetração, sendo detidas por uma folha de papel ou pela camada córnea da pele (IRD/CNEN, 2013).
- Partículas Beta (β): São elétrons (β^-) ou pósitrons (β^+) de massa e carga menores que as partículas alfa, com maior poder de alcance no tecido, mas ainda limitados a alguns milímetros de profundidade (Hall; Giaccia, 2012).
- Raios Gama (γ) e Raios-X: Ondas eletromagnéticas de alta frequência sem massa, com grande poder de penetração, requerendo barreiras densas como chumbo ou concreto para atenuação eficaz (IRD/CNEN, 2013).
- Nêutrons: Sem carga elétrica, são altamente penetrantes e interagem de forma indireta com o material biológico, causando ionizações secundárias (IRD/CNEN, 2013).

Figura 1: Tipos de radiação ionizante.

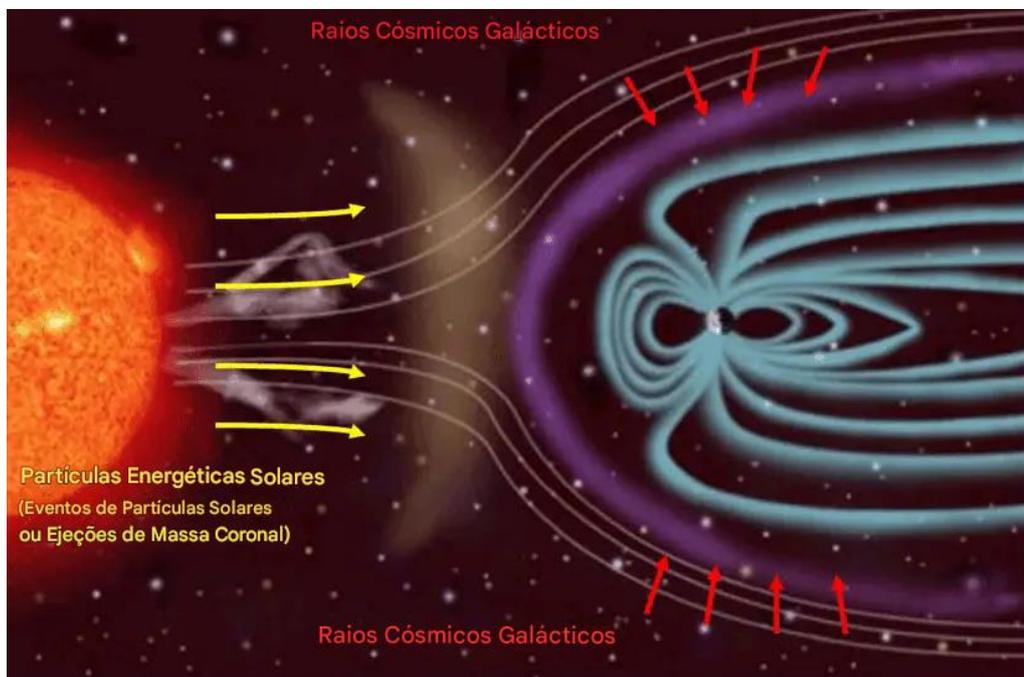


Fonte: Mundo Educação. Esquema ilustrativo do poder de penetração dos tipos de radiação ionizante.

2.1.2 Fontes naturais e artificiais de radiação

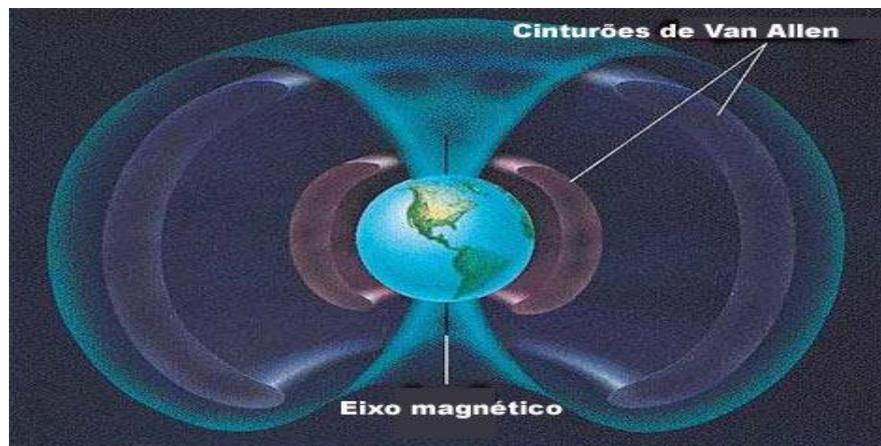
Dentre as principais fontes naturais de radiação ionizante estão os componentes cósmicos (Figuras 2 e 3), terrestres e internos (como o potássio-40 presente no organismo). Contribuem também o radônio e seus descendentes nos ambientes internos. Já as fontes artificiais envolvem atividades médicas (radiografias, tomografias, radioterapia), indústria nuclear, testes de armamentos e acidentes radiológicos (IRD/CNEN, 2013).

Figura 2: Raios Cósmicos Galácticos e Partículas Energéticas Solares.



Fonte: Adaptado de CONNOR, 2020.

Figura 3: Cinturões de Van Allen.



Fonte: ANDRÉ, 2011.

2.1.3 Unidades de medida da radiação

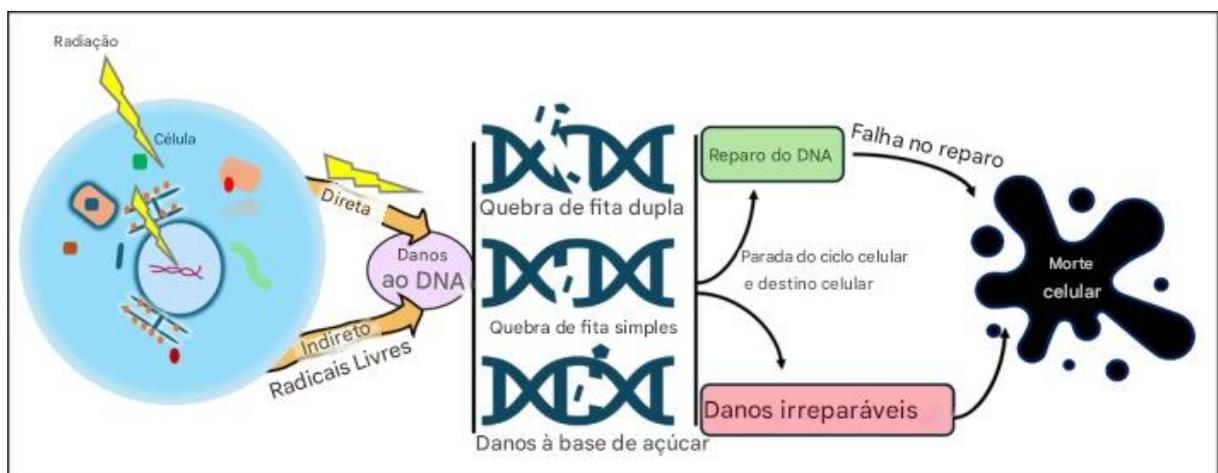
Devido a essa heterogeneidade de fontes e a sua capacidade de causar danos a nível molecular por serem partículas ou ondas eletromagnéticas energizadas, foram estabelecidas unidades de medidas para monitorar e proteger os seres humanos e o meio ambiente, as 3 unidades de medidas existentes são:

- gray (Gy): Unidade de dose absorvida, correspondente a 1 joule de energia depositada por quilograma de tecido (ICRP, 2007).
- sievert (Sv): Unidade de dose equivalente, ajustada por fatores de ponderação para diferentes tipos de radiação e sensibilidade dos órgãos, refletindo risco biológico (Hall; Giaccia, 2012).
- becquerel (Bq): Medida de atividade radioativa, correspondendo a uma desintegração por segundo, utilizada para quantificar emissão de radionuclídeos (IRD/CNEN, 2013).

2.1.4 Mecanismos de interação da radiação com a matéria biológica

Sendo assim, é importante salientar como a radiação pode causar ionização direta em moléculas de DNA ou indireta através da produção de radicais livres (como -OH) na água intracelular, levando a quebras de fita simples ou dupla e alterações base-cadeia (Figura 4). O tipo e a energia da radiação determinam o padrão de deposição de energia (LET – Linear Energy Transfer), influenciando a severidade dos danos celulares (Mckelvey *et al.*, 2018).

Figura 4: Mecanismos de dano celular pela radiação.



Fonte: Adaptado de Saini *et al.* (2025).

2.2 EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO IONIZANTE

2.2.1 Danos ao DNA e reparo celular

Como foi visto anteriormente, as interações diretas podem resultar em quebras de fita dupla, por vezes irreparáveis, enquanto danos indiretos promovem oxidação de bases e rompimentos de fita simples. Para evitar isso, as células apresentam sistemas de reparo (NER, BER e recombinação homóloga) para restaurar a integridade, mas erros ocasionais geram mutações e instabilidade genômica (Hall; Giaccia, 2012).

2.2.2 Efeitos agudos e crônicos da exposição

Através desses erros ocasionais podem ser gerados efeitos agudos, que se manifestam em minutos a dias, incluindo síndrome aguda da radiação (náuseas, vômitos, diarreia e leucopenia), e efeitos tardios podem emergir anos depois, como fibrose, catarata, infertilidade e predisposição a neoplasias, dependendo da dose e do órgão-alvo (IRD/CNEN, 2013).

2.2.3 Resposta inflamatória e estresse oxidativo

Outro mecanismo que ocasiona problemas no organismo pós a exposição, é a liberação de sinais de estresse, que ativam NF- κ B, aumentando citocinas pró-inflamatórias (TNF- α , IL-1 β , IL-6) e gerando espécies reativas de oxigênio (ROS). Caso se estabeleça uma inflamação crônica, vai contribuir para danos vasculares e teciduais persistentes (Mckelvey *et al.*, 2018).

2.2.4 Alterações hematológicas e imunológicas em expostos

Outras alterações esperadas são no tecido hematopoiético e no sistema imunológico, uma vez que, células de rápida divisão, como progenitores hematopoiéticos, são sensíveis à radiação. Observa-se neutropenia, linfopenia, anemia e trombocitopenia, além de disfunção de células imunes adaptativas e inata, impactando a resposta a infecções (IRD/CNEN, 2013).

2.2.5 Aberrações cromossômicas instáveis

Apesar de todas essas alterações, o padrão ouro para identificar alguém que

sofreu danos relacionados a radiação ionizante e estimar a dose recebida são alterações estruturais nos cromossomos induzidas por agentes, principalmente pela radiação ionizante, que diferente das aberrações estáveis, levam a morte celular. As três principais aberrações instáveis são os cromossomos dicêntricos, fragmentos acêntricos e cromossomos em anel, em exposições agudas esses achados são o padrão ouro, além de permitirem estimar a dose absorvida (NAKATA *et al.*, 2022). As principais técnicas citogenéticas para identificar essas aberrações são: Análise de cromossomos em metáfase, FISH, mFISH e o Teste de Micronúcleo.

2.3 PROTEÍNAS SÉRICAS

2.3.1 Origem e funções das proteínas séricas

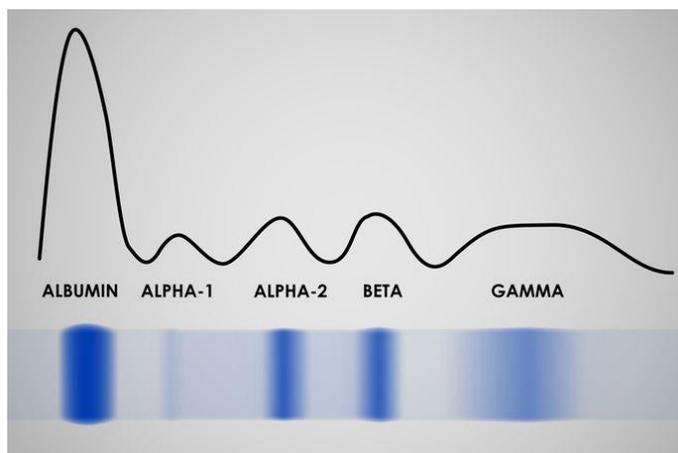
Entretanto, as proteínas séricas são um forte candidato para se tornarem uma alternativa para as aberrações cromossômicas instáveis, produzidas majoritariamente pelo fígado, as proteínas séricas mantêm a homeostase osmótica (albumina), transportam hormônios e fármacos e participam da resposta imune (imunoglobulinas) (Motta *et al.*, 2009).

2.3.2 Principais frações proteicas

Devido as diferentes propriedades dessas proteínas presentes no soro, como por exemplo, o tamanho da molécula, durante a corrida da eletroforese elas se separam em frações. As principais frações são (Figura 5):

- Albumina: 55–60% do total proteico, regula pressão oncótica e transporte de ácidos graxos livres.
- α 1-Globulinas: Contêm alfa-1 glicoproteína ácida, alfa-fetoproteína e entre outras.
- α 2-Globulinas: Incluem haptoglobina e macroglobulina.
- β -Globulinas: Transportadoras de ferro (transferrina) e complemento.
- γ -Globulinas: Principalmente imunoglobulinas (IgG, IgA, IgM) (Silva *et al.*, 2008).

Figura 5: Bandas da eletroforese de proteínas séricas.



Fonte: LEMOS, 2023.

2.3.3 Fatores que alteram o perfil proteico

Dentro dessas 5 frações, algumas alterações são comuns, como a inflamação aguda que provoca aumento de proteínas de fase aguda ($\alpha 1$ e $\alpha 2$), enquanto doenças hepáticas crônicas causam hipoalbuminemia (Silva *et al.*, 2008) Exposição a radicais livres por radiação também altera a síntese hepática e aumenta o turnover proteico (Zhu *et al.*, 2021).

2.3.4 Biomarcadores séricos de dano tecidual ou inflamação

Enquanto, há proteínas mais específicas como PCR e SAA que se elevam na fase aguda inflamatória (Zhang *et al.*, 2019). E em irradiados, estudos sugerem aumento de haptoglobina e alfa-1-antitripsina (Widlak *et al.*, 2015).

2.4 ELETROFORESE DE PROTEÍNAS SÉRICAS

2.4.1 Fundamentos da técnica de eletroforese

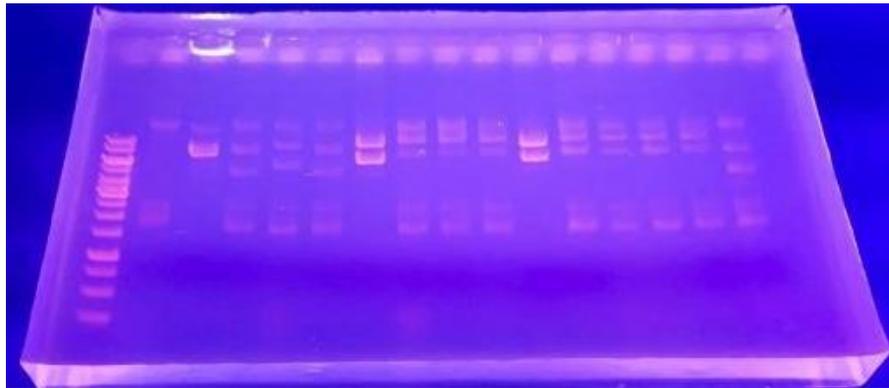
Para identificar cada fração é utilizado a técnica de eletroforese, que se baseia no deslocamento diferencial de proteínas em um campo elétrico conforme sua mobilidade eletroforética, determinada pela carga líquida e forma molecular, além do raio da molécula e da viscosidade do meio.

2.4.2 Tipos de eletroforese

Com o passar dos anos, avanços na pesquisa e na tecnologia, foram sendo desenvolvidos diferentes tipos de eletroforese. Os principais tipos são:

- Gel de agarose: Adequado para triagem geral de frações (Figura 6).

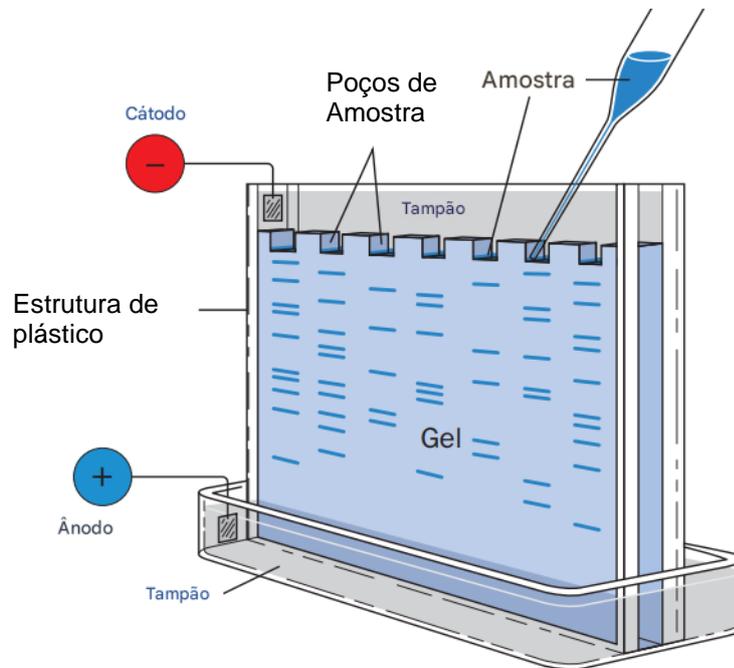
Figura 6: Gel de agarose.



Fonte: FORLABEXPRESS, 2023.

- SDS-PAGE: Separa proteínas pela massa molecular após a desnaturação com SDS (Figura 7).

Figura 7: SDS-PAGE.

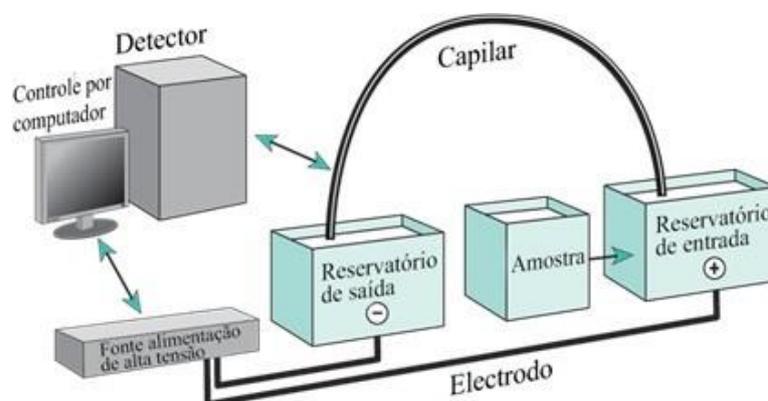


Fonte: Adaptado de VIRTUAL LABS, 2023.

- Eletroforese capilar: Alta resolução e automação, ideal para análises

quantitativas rápidas (Lewis *et al.*, 2017) (Figura 8).

Figura 8: Eletroforese capilar.



Fonte: SIQUEIRA, 2019.

2.4.3 Interpretação dos padrões eletroforéticos

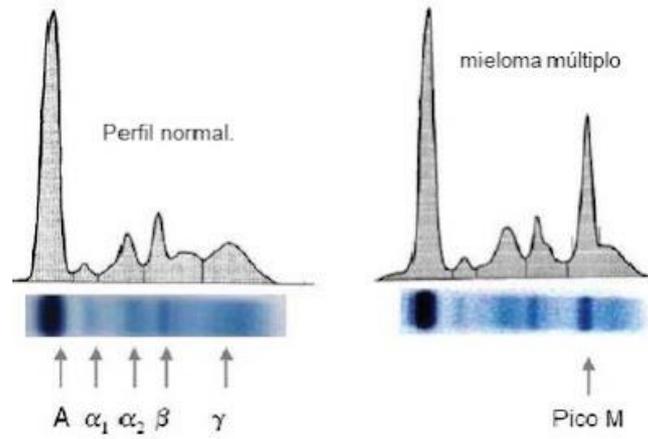
Através desses diferentes tipos são gerados picos de densitometria que permitem quantificação percentual de cada fração; bandas atípicas podem indicar paraproteínas (mieloma múltiplo) ou glicoproteínas modificadas (doenças inflamatórias) (Laboratório Vanderlei Dutra, 2016).

2.4.4 Aplicações clínicas e laboratoriais

Por isso, é bastante utilizada em diagnósticos de gamopatias monoclonais, ao ver uma banda discreta no gel de agarose ou um pico no gráfico de densitometria na região beta, gama ou alfa-2, hipoalbuminemia, comum em doenças hepáticas e em estados inflamatórios, com aumento nas regiões alfa-1 e alfa-2 (Tuazon; Devaraj, 2023) (Figura 9).

Em função disso, seria interessante estudar as principais alterações na eletroforese de proteínas séricas de indivíduos expostos à radiação ionizante, tanto para ajudar a identificar se o indivíduo foi exposto, quanto para entender os danos que a radiação ocasionou nele.

Figura 9: Gamopatia Monoclonal.



Fonte: INML, 2024.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Buscar identificar alterações no perfil eletroforético de proteínas séricas de pacientes expostos à radiação ionizante através de uma revisão bibliográfica narrativa.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

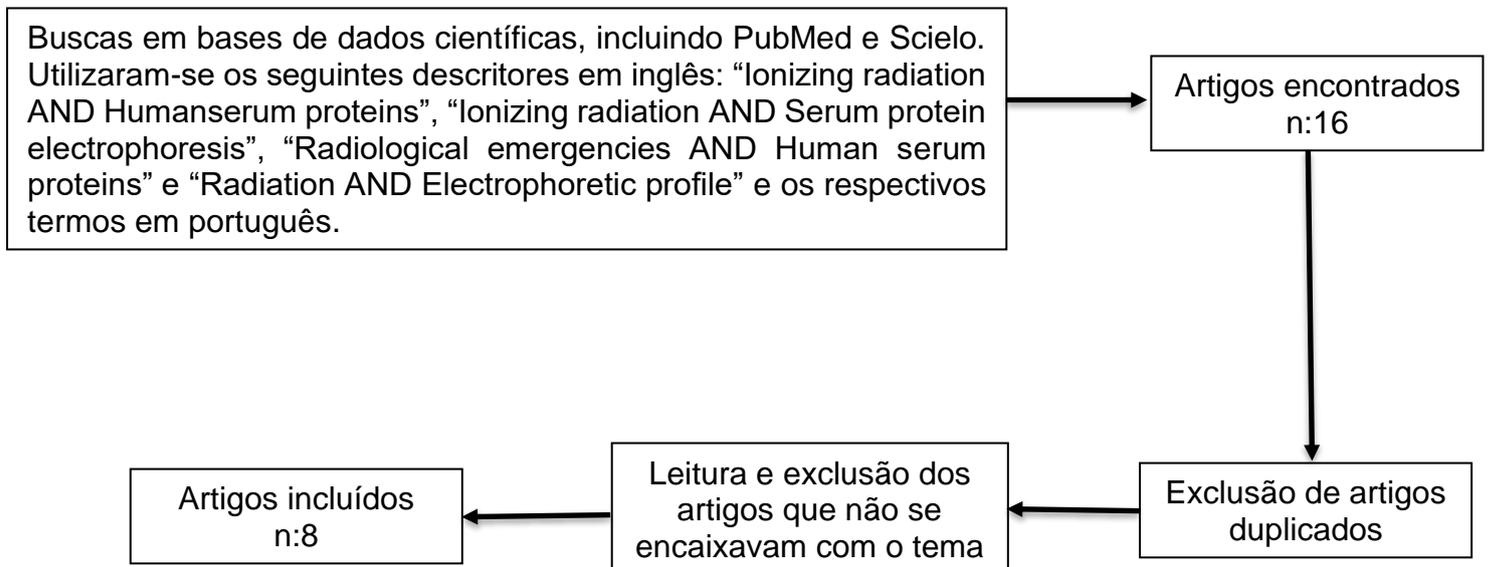
- Demonstrar o padrão eletroforético de proteínas séricas.
- Listar as alterações mais comuns da eletroforese dos pacientes expostos à radiação ionizante.
- Tentar correlacionar como o tempo pós exposição, dose e a gravidade da lesão podem influenciar no perfil eletroforético das proteínas séricas.
- Apresentar a relação entre o perfil eletroforético e os possíveis órgãos expostos.

4 METODOLOGIA

O presente estudo constitui-se em uma revisão narrativa sobre os padrões de eletroforese de proteínas sérica de indivíduos expostos a radiação ionizante e suas variáveis. Inicialmente, para a construção deste trabalho foram realizadas buscas em bases de dados científicas, incluindo PubMed e Scielo. Foram utilizados os seguintes descritores em inglês: “Ionizing radiation AND Human serum proteins”, “Ionizing radiation AND Serum protein electrophoresis”, “Radiological emergencies AND Human serum proteins” e “Radiation AND Electrophoretic profile” e os respectivos termos em português.

Dessa forma, os critérios utilizados para a seleção foram artigos científicos relevantes para o estudo disponíveis nas línguas inglesa e portuguesa. Portanto, inicialmente foram selecionados 16 artigos, após uma análise para excluir artigos duplicados e que não se encaixavam nos critérios do estudo restaram 8 como ilustrado na figura 10.

Figura 10: Fluxograma de seleção dos artigos utilizados no estudo.



5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 OBTENÇÃO DOS DADOS

A obtenção de evidências ao longo da leitura dos artigos, assim como as principais informações em relação à dose recebida, indivíduos analisados, tempo pós-exposição e órgão, sistema ou patologia relacionada estão resumidos no Quadro 1.

Quadro 1: Resumos dos resultados e principais informações.

Autor (ano)	Indivíduos analisados	Dose(s) Absorvida(s)	Tempo(s) Pós-exposição	Órgão/sistema/patologia associado	Principal(is) Resultado(s)
Helmig et al. (2019)	Ex-mineradores de urânio	Não estimado	~40anos	Câncer de pulmão	Elevação da haptoglobina
Lima et al. (2017)	Ratos Wistar	5 Gy	72 horas	Cérebro e fígado	Diminuição na albumina
Li et al. (2016)	Ratos Swiss-Wbster	2 Gy	3 meses	Fígado	Elevação de C3
Lima et al. (2016)	Ratos Wistar	5 Gy	12, 24, 48, 72 e 96 horas e 35dias	Coração	Diminuição da albumina após 12h, com elevação gradual entre 24 e 96h. Diminuição de alfa-1 entre 12h e 24, com elevação gradual entre 48 e 96h. Elevação de alfa-2 após 72h. Elevação de beta após 35 dias. Ausência de variação significativa em gama.
Widlak et al. (2015)	Pacientes com câncer de células escamosas de cabeça e pescoço	1,8 Gy diário	1 mês	Câncer de células escamosas de cabeça e pescoço	Elevação de alfa-1-antitripsina Elevação de haptoglobina Diminuição da transferrina
Deperas-Kaminska et. al. (2014)	Pacientes com câncer de mama	2, 10, 20 e 50 Gy	No mesmo dia	Câncer de mama	Aumento da alfa-2-macroglobulina.
Rybkina et al. (2014)	Trabalhadores expostos ocupacionalmente	0,5 a 3 Gy	~42 anos	Sistema Imunológico	Leve diminuição de IgG e aumento de IgA e IgM
Nylund et al. (2014)	Pacientes de acidente radiológico	0,5 a 2,7 Gy	14 anos	Não especificado	Diminuição da haptoglobina

Fonte: Elaboração própria.

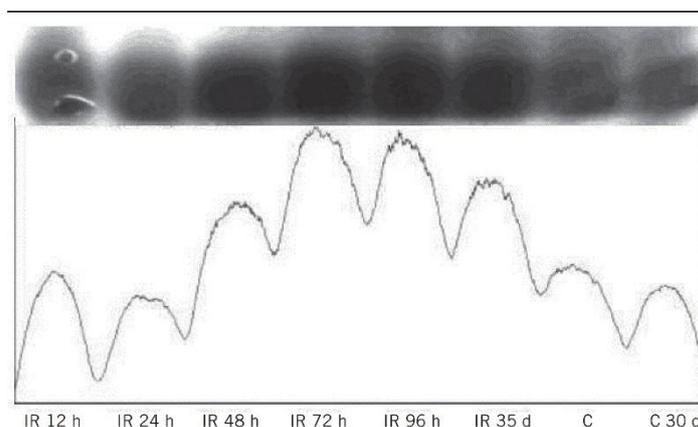
5.2 ALBUMINA

A proteína sérica mais abundante do sangue, a albumina, é sintetizada exclusivamente no fígado e tem como funções manter a pressão oncótica e transportar diversas substâncias, como fármacos e hormônios. Por isso, alterações nos seus níveis podem gerar edemas, problemas renais, insuficiência cardíaca e desnutrição devido à falta da pressão oncótica, além de hipotireoidismo e disfunção sexual pela diminuição no transporte dos hormônios.

Estudos têm demonstrado que a exposição à radiação modula a expressão da albumina. Em um estudo em modelo animal conduzido por LIMA *et al.* (2017), observou-se diminuição na banda da albumina 72 horas após a irradiação de corpo inteiro com 5 Gy, principalmente nos soros provenientes das veias jugular e hepática, o que evidencia que essa alteração se deve, principalmente, à irradiação do cérebro e do fígado. Em consonância com esse resultado, LIMA *et al.* (2016), ao aplicar também uma dose de corpo inteiro de 5 Gy em ratos, verificaram-que, que 12 horas após a exposição, houve diminuição significativa da albumina, com aumento gradual entre 24 e 96 horas após a irradiação (Figuras 11 e 16).

Esses resultados podem indicar um importante fator para o agravamento dos efeitos colaterais da exposição à radiação ionizante, devido às suas funções de transporte e manutenção da osmolalidade desempenhadas pela albumina. Dado isso, caso se veja alterações nos níveis de albumina em indivíduos expostos à radiação ionizante, espera-se alterações, desde desnutrição, até disfunções hormonais devido ao papel essencial desempenhado pela albumina.

Figura 11: Perfil eletroforético da albumina da região cardíaca de ratos irradiados.



Fonte: LIMA *et al.*, 2016.

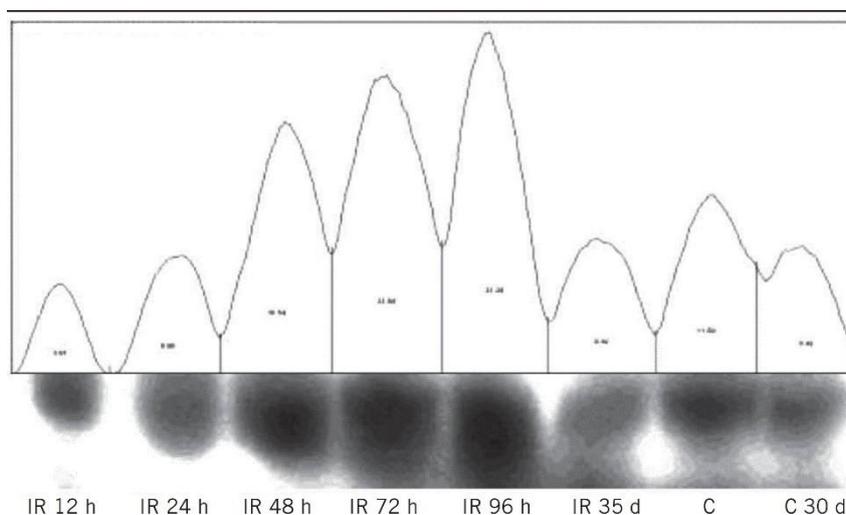
5.3 ALPHA-1

As proteínas presentes nessa banda estão associadas a processos inflamatórios, infecções e respostas imunes, sendo a mais abundante a alfa-1-antitripsina, uma proteína de fase aguda positiva, cuja função é proteger os pulmões e o fígado da ação de enzimas como a elastase neutrofílica.

No estudo realizado em modelo animal por LIMA *et al.* (2016), observou-se uma diminuição na expressão das proteínas dessa banda nas 12 e 24 horas após a exposição. Entretanto, houve aumento progressivo nas 48, 72 e 96 horas (Figuras 12 e 16). Em concordância com esses resultados, o estudo conduzido por WIDLAK *et al.* (2015) identificou um aumento na produção da alfa-1-antitripsina, a mais abundante dessa banda, ao analisar pacientes com câncer de células escamosas de cabeça e pescoço tratados com radioterapia, após 1 mês recebendo uma dose diária de 1,8 Gy.

Por fim, esse achado corrobora a ideia de que, nos primeiros dias após a exposição à radiação, o indivíduo apresenta um quadro inflamatório, uma vez que, tanto a banda, como sua principal proteína aumentam comumente nesse caso. Tal fato, não causa diretamente prejuízo ao indivíduo, mas na verdade é um indício do seu estado devido a exposição. Entretanto, o tempo seria um tempo limitante, devido a tendência das proteínas séricas decaírem após 96 horas.

Figura 12: Perfil eletroforético da banda alfa-1 do soro da região cardíaca de ratos irradiados.



Fonte: LIMA *et al.*, 2016.

5.4 ALPHA-2

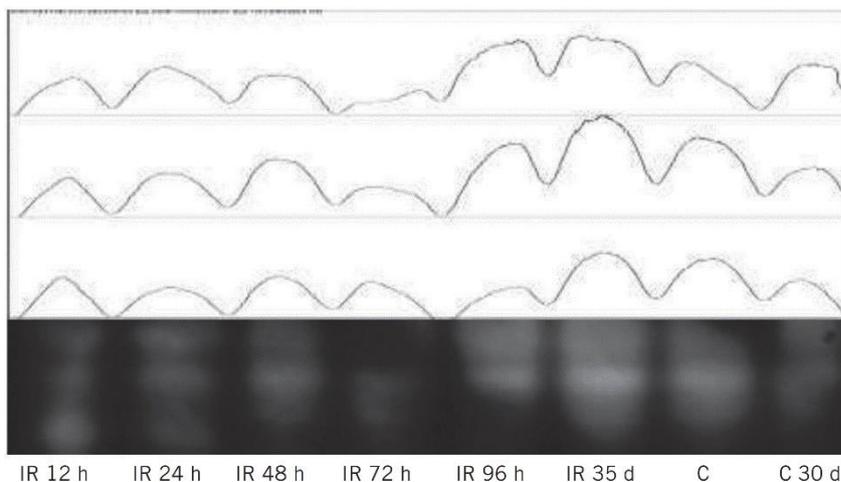
Essa banda também está associada a processos inflamatórios e infecciosos, sendo suas duas proteínas mais abundantes a alfa-2-macroglobulina, cuja função é inibir enzimas proteolíticas, e a haptoglobina, que se liga à hemoglobina para evitar danos teciduais e processos oxidativos.

No estudo conduzido por LIMA *et al.* (2016), observou-se um aumento considerável dessa banda apenas 72 horas após a irradiação (Figuras 13 e 16). Por sua vez, no estudo realizado por WIDLAK *et al.* (2015), a haptoglobina apresentou regulação positiva nos pacientes analisados. De forma semelhante, no estudo conduzido por HELMIG *et al.* (2019), foi observado, em ex-mineradores de urânio, que o aumento da haptoglobina pode estar associado ao desenvolvimento de câncer de pulmão induzido pela exposição à radiação. Entretanto, no estudo realizado por NYLUND *et al.* (2014), verificou-se que, no soro de três pacientes que sofreram um acidente radiológico em 1994, em Kiisa, Estônia, os níveis de haptoglobina estavam reduzidos, 14 anos após o acidente. Esse achado pode indicar que a expressão dessa proteína varia de acordo com o nível de estresse oxidativo gerado pela radiação, que tende a ser maior nos pacientes que sofreram o acidente, e o tempo decorrido após a exposição, ocasionando diferentes perfis na banda alfa-2.

Em relação à alfa-2-macroglobulina, o estudo feito por LI *et al.* (2016), com o intuito de analisar a toxicidade hepática após a exposição cósmica, observou que em camundongos expostos a uma dose de corpo inteiro de 2 Gy por íons de ferro, os níveis dessa proteína no soro estavam elevados após três meses. Por outro lado, no estudo realizado por DEPERAS-KAMINSKA *et al.* (2014), apenas após as pacientes com câncer de mama receberem doses a partir de 20 Gy foi observada uma diminuição significativa da alfa-2-macroglobulina.

Portanto, tanto a presença de inflamação, como também danos hepáticos causados por radiação cósmica, podem estar relacionados ao aumento dessa banda, enquanto sua redução pode refletir o nível de estresse oxidativo induzido pela exposição à radiação ionizante. Entretanto, poucas afirmações podem ser feitas, devido a necessidade de estudos mais padronizados para se observar melhor o comportamento dessa banda para inferir a sua utilidade na identificação e no prognóstico de indivíduos irradiados.

Figura 13: Perfil eletroforético da banda alfa-2 do soro da região cardíaca de ratos irradiados.



Fonte: LIMA *et al.*, 2016.

5.5 BETA

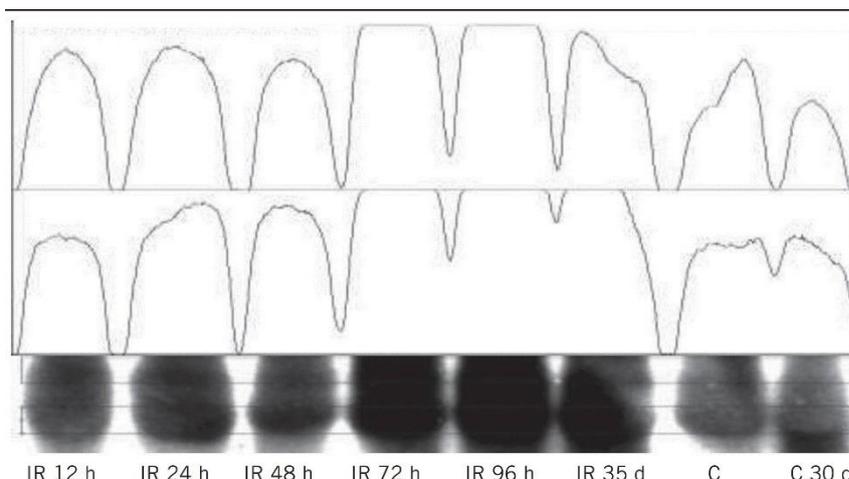
Essa banda apresenta um grupo mais heterogêneo de proteínas, sendo a transferrina e o componente C3 do sistema complemento as proteínas mais abundantes. Alterações nesses componentes estão associadas, respectivamente, a casos de anemia e a doenças glomerulares.

De acordo com os achados de LIMA *et al.* (2016), observou-se uma modulação mais tardia, com aumento significativo apenas no 35º dia após a exposição (Figuras 14 e 16). Em contrapartida, no estudo realizado por WIDLAK *et al.* (2015), foi identificada regulação negativa da transferrina nos pacientes analisados, resultado semelhante ao observado nas vítimas avaliadas por NYLUND *et al.* (2014).

Em relação à proteína C3, o estudo conduzido por LI *et al.* (2016) verificou um aumento em seus níveis no soro de ratos três meses após a irradiação.

Fatores como a dose recebida, o nível de estresse causado e o tempo decorrido após a exposição podem ter contribuído para os resultados divergentes entre os estudos, indicando a necessidade de investigações adicionais para esclarecer o comportamento dessa banda em indivíduos expostos à radiação ionizante. Entretanto, o fato de ter-se observado aumento de C3, liga um alerta para que caso seja observado aumento dessa banda se investigue presença de problemas renais.

Figura 14: Perfil eletroforético da banda beta do soro da região cardíaca de ratos irradiados.



Fonte: LIMA *et al.*, 2016.

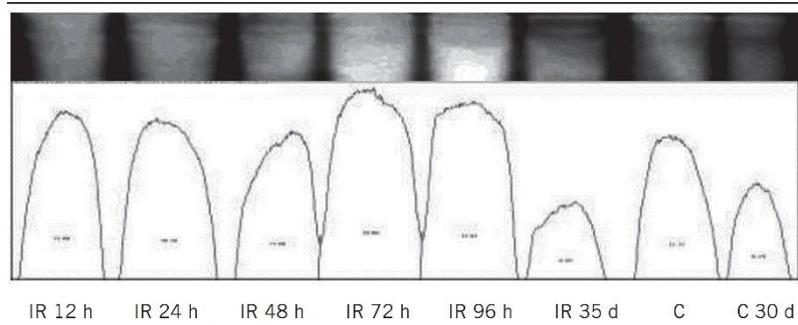
5.6 GAMA

Essa banda contém as imunoglobulinas produzidas pelos plasmócitos, cuja função é atuar no sistema imunológico, sendo a IgG a mais abundante.

De acordo com os dados obtidos por LIMA *et al.* (2016), observou-se pouca variação nessa faixa, com tendência a manter níveis constantes nos períodos analisados (Figuras 15 e 16). Em consonância com esse resultado, o estudo conduzido por RYBKINA *et al.* (2014) identificou, em trabalhadores expostos ocupacionalmente à radiação gama externa em doses de 0,5 a 3 Gy, uma leve diminuição nos níveis de IgG em comparação ao grupo controle; entretanto, as imunoglobulinas IgA e IgM se apresentaram elevadas.

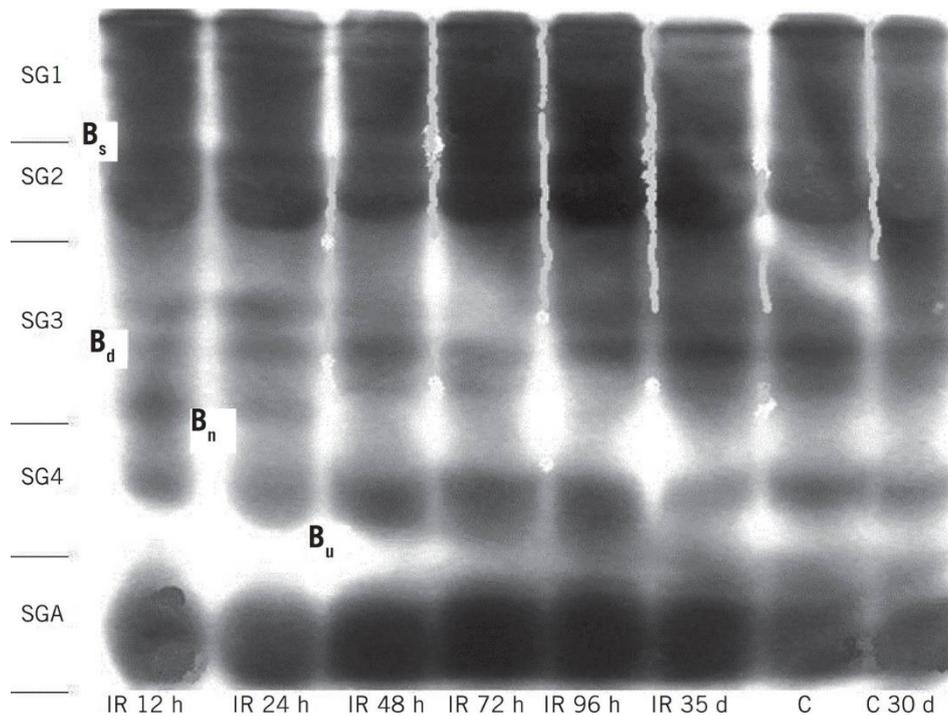
Esses achados reforçam a tendência de que essa banda apresenta poucas variações frente à exposição à radiação ionizante, indicando poucas alterações no sistema imunológico, no sentido de produção de imunoglobulinas. Entretanto, devido ao fato de haver supressão imunológica em indivíduos irradiados, seria interessante mais estudos que dosassem apenas IgG para que fosse feita uma correlação entre os níveis dessas proteínas e pacientes com imunodepressão causada pela radiação ionizante.

Figura 15: Perfil eletroforético da banda gama do soro da região cardíaca de ratos irradiados.



Fonte: LIMA *et al.*, 2016.

Figura 16: Perfil eletroforético de proteínas séricas da região cardíaca de ratos irradiados.



Fonte: LIMA *et al.*, 2016. SGA: Banda Albumina; SG4: Banda Alfa-1; SG3: Banda Alfa-2; SG2: Banda Beta; SG1: Banda Gama.

5.7 PROTEÍNAS SÉRICAS E OS RAIOS CÓSMICOS

Como já foi discutido, os raios cósmicos são uma fonte de risco de exposição à radiação ionizante para os astronautas, por isso, cada vez mais estão investindo na blindagem das naves e trajes espaciais para evitar complicações dessa origem.

Entretanto, devido a possibilidade dessa exposição ocorrer, é de suma importância estudar marcadores biológicos que possam identificar o dano causado aos astronautas devido aos raios cósmicos. Por isso, as proteínas séricas podem ser uma ótima alternativa, pois, no presente estudo foi possível observar que a radiação ionizante consegue modular a expressão dessas proteínas, ainda assim, precisam-se de mais estudos padronizados para que se consiga correlacionar o padrão eletroforético de proteínas séricas com a dose absorvida, dano causado pela radiação e tempo pós-exposição.

Assim como já foi visto, o estudo de Li *et al.* (2016), ao propor observar danos causados por raios cósmicos, identificou a elevação da alfa-2-macroglobulina três meses após a exposição em ratos irradiados por íons de ferro, o que seria visualizado no aumento da banda alfa-2. Enquanto, no estudo realizado por Kimura *et al.* (2024), o objetivo foi identificar mecanismos moleculares das adaptações biológicas induzidas por voos espaciais associadas a missões prolongadas, ao analisar o soro de seis astronautas após ficarem 6 meses a bordo Estação Espacial Internacional, foi observado que proteínas como a Cadeia de Colágeno alfa-1 e Fosfatase Alcalina, que são importantes para o metabolismo ósseo, tiveram sua expressão aumentada, já proteínas como a Lactotransferrina e Coronin-1, que estão associadas ao sistema imunológico, tiveram sua expressão diminuída.

Enquanto, no estudo realizado por Zwarf *et al.* (2022), ao analisar o soro de 65 astronautas, 52 homens e 13 mulheres, da Estação Espacial Internacional, foi notado a diminuição da albumina após o voo, o que impulsiona o surgimento de eventos trombóticos em astronautas que tomam contraceptivos orais. Tal fato corrobora que estudar as proteínas é de suma importância para entender as modificações no organismo devido as viagens espaciais, entretanto necessitam-se de mais estudos que correlacionem esses achados à exposição aos raios cósmicos.

5.8 PERSPECTIVAS

No trabalho desenvolvido por LIMA (2016), foi possível observar que a radiação pode modular a expressão das proteínas séricas, entretanto foi observado também o surgimento de novas bandas em irradiados, sugerindo mudanças no perfil proteico, o que justifica a dificuldade de definir um padrão eletroforético de proteínas séricas. Contudo, essas mudanças ajudam a entender o agravamento das lesões causadas pela radiação, por exemplo, alterações na banda da albumina refletem alterações no metabolismo humano, devido sua função de transporte e manutenção da osmolaridade sanguínea.

Portanto, é importante ressaltar que o padrão ouro mais preconizado para identificar a presença de danos associados a radiação é a identificação de aberrações cromossômicas, através de técnicas de citogenética, que inclusive permitem deduzir a dose absorvida. Entretanto, geralmente o custo dessas técnicas é caro e a depender da técnica citogenética escolhida o resultado pode ser demorado. Dado isso, utilizar a eletroforese de proteínas séricas seria uma alternativa mais barata, rápida e com possibilidade de analisar mais de um indivíduo ao mesmo tempo, apesar de que ela se limitaria a entender os possíveis danos causados diretamente pela radiação e suas consequências, pois até o momento as evidências não permitem associar seus resultados com a dose recebida.

6 CONCLUSÃO

A eletroforese de proteínas séricas é uma técnica amplamente utilizada devido a sua relevância ao inferir possíveis distúrbios no paciente, devido a capacidade de verificar os níveis de proteínas importantes para o metabolismo humano. Por isso, estudar e compreender as possíveis variações em indivíduos expostos a radiação ionizante ajudaria não só a identificar melhor se foi um paciente exposto, como também, quais distúrbios ele está enfrentando devido a exposição para que haja um prognóstico mais adequado.

A presente revisão narrativa teve como objetivo analisar o perfil eletroforético de proteínas séricas em indivíduos expostos à radiação ionizante, com foco nas alterações mais frequentes observadas em cada fração proteica, bem como na influência do tempo após exposição, da dose recebida e da gravidade da lesão sobre essas alterações, além de relacioná-las aos órgãos potencialmente afetados.

Os dados revisados demonstram que a exposição à radiação ionizante promove alterações significativas no padrão eletroforético das proteínas séricas, embora essas modificações variem conforme a banda analisada, o tempo decorrido após a exposição e o contexto clínico ou experimental. A albumina, sintetizada no fígado, demonstrou redução nos períodos iniciais após a irradiação, refletindo alterações hepáticas e possivelmente cerebrais. As bandas alfa-1 e alfa-2 apresentaram comportamento compatível com processos inflamatórios, com destaque para a elevação da alfa-1-antitripsina e da haptoglobina, ambas proteínas de fase aguda. A alfa-2-macroglobulina, por sua vez, apresentou comportamento mais variável, dependendo da dose e do tempo de exposição, além de correlação de hepatotoxicidade ocasionada por raios cósmicos.

A banda beta, representada por proteínas como a transferrina e o componente C3, mostrou alterações mais tardias e respostas diversas entre os estudos, sugerindo influência de múltiplos fatores, como tipo de radiação, intensidade do estresse oxidativo e função renal. Por fim, a banda gama, composta pelas imunoglobulinas, mostrou relativa estabilidade, especialmente em relação à IgG, ainda que a IgA e IgM tenham se mostrado elevadas em alguns contextos de exposição ocupacional.

Esses achados reforçam a importância da eletroforese de proteínas séricas como ferramenta auxiliar na compreensão dos efeitos sistêmicos da radiação ionizante. O padrão de alterações observado reflete não apenas a dose e o tempo de

exposição, mas também o envolvimento específico de órgãos como fígado, pulmões, rins e sistema imunológico. Entretanto, o tempo seria um fator limitante para o biomonitoramento das radiações ionizante, especialmente para alfa-1, uma vez que, tende a decair após 96 h, não permitindo detectar exposições mais antigas (de maneira retrospectiva).

Diante da variabilidade encontrada entre os estudos, torna-se evidente a necessidade de pesquisas adicionais padronizadas, que considerem fatores como dose, tipo de radiação, vias de exposição e tempo de seguimento, para que se possa consolidar o uso do perfil eletroforético das proteínas séricas como marcador de lesão e resposta biológica à radiação ionizante, e talvez, uma alternativa mais barata e prática do que a análise das aberrações cromossômicas.

REFERÊNCIAS

ANDRÉ, S. F.; COMPLETO, V. M. P. **Prof. André França**. Disponível em: <<https://profplanck.blogspot.com/2011/10/cinturao-de-van-allen.html>>. Acesso em: 8 aug. 2025.

CONNOR, N. **O que é energia de raios cósmicos - Definição**. Disponível em: <https://www.radiation-dosimetry.org/pt-br/o-que-e-energia-de-raios-cosmicos-definicao/> . Acesso em: 8 aug. 2025.

DE ALMEIDA, C. S. **Chernobyl: o pior desastre nuclear da História foi há 37 anos**. SIC, 2023. Disponível em: <<https://sicnoticias.pt/especiais/chernobyl/2023-04-26-Chernobyl-o-pior-desastre-nuclear-da-Historia-foi-ha-37-anos-b8f615b6>> . Acesso em: 21 may. 2025.

DEPERAS-KAMINSKA, M. *et al.* Radiation-induced changes in levels of selected proteins in peripheral blood serum of breast cancer patients as a potential triage biodosimeter for large-scale radiological emergencies. **Health physics**, v. 107, n. 6, p. 555–563, 2014.

FORLABEXPRESS. **Por que escolher corante não mutagênico para eletroforese**. Disponível em: <<https://blog.forlabexpress.com.br/corante-nao-mutagenico/>>. Acesso em: 8 aug. 2025.

HALL, E. J.; GIACCIA, A. J. Radiobiology for the radiologist. 7. ed. Saint Paul: **Lippincott Williams & Wilkins**, 2012.

HELMIG, S.; LOCHNIT, G.; SCHNEIDER, J. Comparative proteomic analysis in serum of former uranium miners with and without radon induced squamous lung cancer. **Journal of occupational medicine and toxicology** (London, England), v. 14, n. 1, p. 9, 2019.

ICRP. International Commission on Radiological Protection. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Oxford: **Pergamon Press**, 2007.

INML, **GAMOPATIAS MONOCLONAIS**. Disponível em: <<https://inml.com.br/gamopatias-monoclonais/>>. Acesso em: 8 aug. 2025.

IRD/CNEN. Instituto de Radioproteção e Dosimetria. Radiação e dosimetria: fundamentos. Rio de Janeiro: **IRD**, 2013.

KIMURA, Y. *et al.* Changes in the astronaut serum proteome during prolonged spaceflight. **Proteomics**, v. 24, n. 10, p. e2300328, 2024.

LABORATÓRIO VANDERLEI DUTRA. Manual de instruções para coleta de exames laboratoriais. Porto Velho: **Laboratório Vanderlei Dutra**, 2016. Disponível em: <https://www.labvd.com.br/site/wp-content/uploads/Manual.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2025.

LEMOS, M. **Eletroforese de proteínas: para que serve, como é feita e resultados**. Disponível em: <<https://www.tuasaude.com/eletroforese-de-proteinas/>>. Acesso em: 8 aug. 2025.

LEWIS, J. H. *et al.* *Biologia molecular da célula*. 6. ed. São Paulo: **Garland Science**, 2017.

LI, H. *et al.* Comparative analysis of the serum proteome for biomarker discovery to reveal hepatotoxicity induced by iron ion radiation in mice. **Life sciences**, v. 167, p. 57–66, 2016.

LIMA, C. V.; CAMPOS, T. P. R. Kinetics of the expressions of radiation-induced plasma proteins of the cardiac territory in electrophoresis. **Jornal brasileiro de patologia e medicina laboratorial**, v. 52, n. 3, p. 171–177, 2016.

LIMA, C.V. **Alterações em cinética temporal da expressão de proteínas plasmáticas in vivo e da viabilidade celular in vitro, induzidas pelas radiações ionizantes**. 2016. 133 f. Tese (Doutorado em Ciências e Técnicas Nucleares) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2016.

LIMA, C. V.; CAMPOS, T. P. R. Radiation-induced changes in the electrophoretic profile of serum albumin. **Brazilian archives of biology and technology**, v. 60, n. 0, 2018.

MOTTA, V. *et al.* *Bioquímica clínica para o laboratório: princípios e interpretações*. 5. ed. Rio de Janeiro: **Medbook**, 2009.

MCKELVEY, K. J. *et al.* Radiation, inflammation and the immune response in cancer. **Mammalian genome: official journal of the International Mammalian Genome Society**, v. 29, n. 11–12, p. 843–865, 2018.

NAKATA, A. *et al.* Cytogenetic Biodosimetry in Radiation Emergency Medicine: 3. The Basics of Chromosomes for Biodosimetry. **Radiation Environment and Medicine**, v. 11, n. 2, p. 82–90, 2022.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. *Space Radiation Hazards and the Vision for Space Exploration: Report of a Workshop*. Washington, DC: **The National Academies Press**. 2006.

NOVAIS, S. A. Radioatividade. **Mundo Educação**. Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/definindo-radioatividade.htm>> . Acesso em: 28 jul. 2025.

NYLUND, R. *et al.* Profiling of low molecular weight proteins in plasma from locally irradiated individuals. *Journal of radiation research*, v. 55, n. 4, p. 674–682, 2014.

OMS. Radiation: Health consequences of the Fukushima nuclear accident. **OMS**, 2016. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/health-consequences-of-fukushima-nuclear-accident?utm_source=chatgpt.com> . Acesso em: 1 jul. 2025.

ROMANO, R. T. A energia nuclear e o meio ambiente. **Jusbrasil**, 2021. Disponível em: <<https://jus.com.br/artigos/93104/a-energia-nuclear-e-o-meio-ambiente>> . Acesso em: 21 maio. 2025.

RYBKINA, V. L. *et al.* Expression of blood serum proteins and lymphocyte differentiation clusters after chronic occupational exposure to ionizing radiation. **Radiation and environmental biophysics**, v. 53, n. 4, p. 659–670, 2014.

SAINI, S.; GURUNG, P. A comprehensive review of sensors of radiation-induced damage, radiation-induced proximal events, and cell death. **Immunological reviews**, v. 329, n. 1, p. e13409, 2025.

SILVA, R. O. DE P. E.; LOPES, A. DE F.; FARIA, R. M. D. DE. Eletroforese de proteínas séricas: interpretação e correlação clínica. **Rev Med Minas Gerais**, v. 18, n. 2, p. 116–122, [s.d.].

SIQUEIRA, G. **Eletroforese e eletroforese capilar**. Disponível em: <https://pt.linkedin.com/pulse/eletroforese-e-capilar-gilson-siqueira> . Acesso em: 10 aug. 2025.

SUN, Q. *et al.* The effect of protracted exposure to radiation on liver injury: A cohort study of industrial radiographers in Xinjiang, China. **International journal of environmental research and public health**, v. 15, n. 1, 2018.

TUAZON, S. A.; DEVARAJ, S. Serum Protein Electrophoresis. **Medscape**, 2023. Disponível em: <https://emedicine.medscape.com/article/2087113-overview> . Acesso em: 10 jul. 2025.

VIRTUAL LABS. **Proteins analysis using polyacrylamide gel electrophoresis (PAGE)**. Disponível em: <<http://vlabs.iitkgp.ac.in/biochem/Exp5/procedure.html>>. Acesso em: 8 aug. 2025.

WIDLAK, P. *et al.* Serum proteome signature of radiation response: Upregulation of inflammation-related factors and downregulation of apolipoproteins and coagulation factors in cancer patients treated with radiation therapy--A pilot study. **International journal of radiation oncology, biology, physics**, v. 92, n. 5, p. 1108–1115, 2015.

YAHYAPOUR, R. *et al.* Radiation-induced inflammation and autoimmune diseases. **Military medical research**, v. 5, n. 1, p. 9, 2018.

ZHANG, Y. *et al.* Acute phase reactant serum amyloid A in inflammation and other diseases. **Advances in clinical chemistry**, v. 90, p. 25–80, 2019.

ZHU, W. *et al.* Radiation-induced liver injury and hepatocyte senescence. **Cell death discovery**, v. 7, n. 1, p. 244, 2021.

ZWART, S. R. *et al.* Albumin, oral contraceptives, and venous thromboembolism risk in astronauts. **Journal of applied physiology (Bethesda, Md.: 1985)**, v. 132, n. 5, p. 1232–1239, 2022.