



PBPC
ISSN 2674-9432



Qualis A3
CAPES 2021-2024



DOI - Crossref

Latindex



Indexado no
Acadêmico

REVISÃO DE ESCOPO PARA O PANORAMA DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DE RADIONUCLÍDEOS: FONTES, DISPERSÃO, BIOACUMULAÇÃO E ESTRATÉGIAS DE REMEDIAÇÃO.

Hugo Leonardo Veloso de Sales, Deivson Lucas Fonseca de Santana, Nicole Samico Guerra, Ayla Sarah de Freitas Bezerra, Cleomácio Miguel da Silva



<https://doi.org/10.36557/2674-9432.2026v5n6p1026-1058>

Artigo recebido em 22 de Junho e publicado em 22 de Agosto de 2026

REVISÃO DE LITERATURA

RESUMO

O objetivo deste estudo foi realizar uma revisão de escopo da literatura para identificar e mapear pesquisas que relatam a dispersão, impactos e remediação de fontes de contaminação por radionuclídeos. Foram feitas pesquisas nas bases de dados *Web of Science* (WOS) e Scopus, com *strings* de busca estruturadas sendo os descritores ligados por operadores lógicos, booleanos, utilizando a estratégia população, conceito, contexto (PCC) para formar a questão norteadora e elaborar os critérios de elegibilidade em revisões de escopo. O estudo se utilizou do método apresentado pelo manual JBI para revisões de escopo e seguiu as etapas do protocolo PRISMA-ScR para reportar os resultados. Durante as buscas nas bases foram identificados 52 estudos, filtrados como *Open Source*, que compreendem um período de publicação de 2001 a 2025, com 6 fontes na base WOS e 46 na Scopus. Após a aplicação dos critérios de elegibilidade foram selecionadas 26 das fontes extraídas e acrescidas de 6 artigos obtidos anteriormente, totalizando 32 estudos para a análise qualitativa. Esta revisão mapeou como elementos radioativos podem contaminar o ambiente, animais e seres humanos revelando uma lacuna que indica uma ausência de pesquisas em países latino-americanos sobre esse tema.

Palavras-chave: radionuclídeos; monitoramento ambiental; contaminação radioativa; radioisótopo; impacto ambiental; revisão de escopo da literatura.



ABSTRACT

The objective of this study was to conduct a scoping review of the literature to identify and map research reporting on the dispersion, impacts, and remediation of radionuclide contamination sources. Searches were performed in the Web of Science (WOS) and Scopus databases using structured search strings with descriptors linked by Boolean operators and applying the Population, Concept, and Context (PCC) strategy to formulate the guiding question and establish eligibility criteria. The study employed the methodology outlined in the JBI manual for scoping reviews and followed the PRISMA-ScR protocol steps for reporting results. Database searches identified 52 studies (filtered as Open Access) published between 2001 and 2025, comprising 6 sources from WOS and 46 from Scopus. After applying eligibility criteria, 26 of the retrieved sources were selected and supplemented by 6 previously obtained articles, resulting in a total of 32 studies for qualitative analysis. This review mapped how radioactive elements can contaminate the environment, animals, and humans, revealing a gap that indicates a lack of research on this topic in Latin American countries.

Keywords: radionuclides; environmental monitoring; radioactive contamination; radioisotope; environmental impact; scoping review.

Instituição afiliada – Universidade de Pernambuco (UPE).

Hugo Leonardo Veloso de Sales

<http://lattes.cnpq.br/3340297655782344>

<https://orcid.org/0009-0009-4796-6076>

Ayla Sarah de Freitas Bezerra

<http://lattes.cnpq.br/0128923697518311>

<https://orcid.org/0009-0007-9250-9785>

Nicole Samico Guerra

<http://lattes.cnpq.br/4379798276365828>

<https://orcid.org/0009-0000-1266-8954>

Deivson Lucas Fonseca de Santana

<http://lattes.cnpq.br/4152491138274850>

<https://orcid.org/0009-0003-6980-1623>

Cleomácio Miguel da Silva

<http://lattes.cnpq.br/4646424965040385>

<https://orcid.org/0000-0002-0217-1087>

Autor correspondente: *Hugo Leonardo Veloso de Sales*

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



1. INTRODUÇÃO

Os elementos radioativos podem causar impactos ambientais significativos quando são liberados no solo, na água, no ar ou nos organismos vivos em concentrações acima dos níveis naturais de segurança (Buessler *et al.* 2011; Hinton *et al.*, 2007). Esses elementos, conhecidos como radionuclídeos, podem ter origem natural ou artificial. Uma característica ambiental preocupante dos radionuclídeos está relacionada a sua persistência no ambiente, pois alguns possuem meia-vida longa e podem permanecer ativos por anos, décadas ou milhares de anos (Buessler; Aoyama; Fukasawa, 2011).

O problema que se evidencia é que a literatura é extensa, mas fragmentada entre estudos geológicos, ambientais, médicos e industriais. A lacuna inicial explorada decorre da percepção de que falta um mapeamento integrado que reúna fontes de contaminação, dispersão, impactos e remediação.

Questão norteadora: Quais são as principais fontes, mecanismos de dispersão, impactos ambientais e estratégias de remediação relacionadas à contaminação por elementos radioativos?

O objetivo principal é analisar, com base em literatura científica, como os elementos radioativos podem contaminar o solo, a água, o ar, os sedimentos, a vegetação, os animais e os seres humanos. Para atender a esse propósito foram traçados os seguintes objetivos específicos: mapear fontes naturais e antrópicas de radionuclídeos; identificar mecanismos de transporte e dispersão ambiental; sintetizar impactos ecológicos e à saúde humana; classificar estratégias de monitoramento e remediação.

Essa pesquisa busca atender a pesquisadores, gestores ambientais, profissionais de saúde pública, órgãos reguladores e estudantes de pós-graduação.

Esta revisão de literatura foi conduzida de acordo com as orientações metodológicas contidas no *JBIM Manual for Evidence Synthesis* (Aromataris *et al.*, 2024), que estabelece procedimentos para revisões de literatura. A apresentação dos resultados foi reportada seguindo o checklist PRISMA-ScR, protocolo específico para revisões de escopo. Estas, não avaliam a qualidade dos estudos, não fazem síntese quantitativa, e não possuem critérios tão restritivos quanto revisões sistemáticas. Esta revisão buscou analisar os estudos selecionados

sob a ótica dos objetivos de desenvolvimento sustentável, ODS, propostos pela Organização das Nações Unidas, ONU. As seções seguintes são metodologia, resultados e discussão, limitações da revisão e conclusões.

2. METODOLOGIA

O Artigo propõe uma revisão de escopo da literatura e a questão norteadora foi formulada seguindo o modelo População, Conceito e Contexto (PCC), conforme recomendado pelo Manual JBI na seção dedicada às revisões de escopo. A população corresponde aos ambientes e seres vivos afetados; o conceito refere-se à contaminação por radionuclídeos e seus impactos; e o contexto abrange os ambientes onde ocorrem dispersão, bioacumulação e necessidade de remediação.

A presente revisão foi conduzida conforme as diretrizes metodológicas do *JBIManual for Evidence Synthesis* (Aromataris et al., 2024), que orientam a formulação da questão norteadora, a definição dos critérios de elegibilidade, a estratégia de busca, a seleção dos estudos e a extração dos dados. O processo de relato seguiu o checklist PRISMA-ScR, utilizado para garantir clareza, transparência e reprodutibilidade na apresentação dos métodos e resultados (Peters et al., 2022; Tricco et al., 2018). A abordagem pelo protocolo PRISMA propõe três etapas no processo de seleção dos estudos: identificação; triagem; inclusão, considerando os critérios de inclusão e exclusão preestabelecidos.

Uma busca preliminar por revisões existentes foi conduzida conforme recomendado por Aromataris et al. (2024), no *JBIManual for Evidence Synthesis*, com o objetivo de verificar se já havia revisões de escopo ou sistemáticas que abordassem a mesma questão norteadora. Essa etapa permitiu confirmar o ineditismo da lacuna identificada e justificar a realização da presente revisão de escopo. Este artigo não utilizou ferramentas de inteligência artificial (IA) para extrair, selecionar ou interpretar os estudos selecionados na revisão de literatura. A pesquisa buscou identificar a observância direta ou indireta dos objetivos de desenvolvimento sustentável propostos pela ONU, tais como, a ODS 3, saúde e bem-estar; ODS 6, água potável

e saneamento; ODS 14, vida na água; ODS 15, vida terrestre; entre outros que forem contemplados na literatura científica selecionada.

2.1. Estratégia de Busca e Critérios de Elegibilidade

Foram realizadas buscas na coleção principal das bases de dados Scopus e Web of Science Clarivate (WOS) e coletados os metadados das fontes de evidência desta revisão em 14 de julho de 2026. O período de publicação dos estudos extraídos da Scopus compreendeu do ano 2001 a 2026, enquanto na WOS abrangeu de 2009 a 2025.

String de busca utilizada na Scopus: TITLE-ABS-KEY (("radionuclides" OR "radioactive elements" OR "radioisotopes") AND ("environmental contamination" OR "radioactive contamination" OR "environmental pollution") AND ("environmental impact" OR "ecotoxicology" OR "bioaccumulation" OR "environmental exposure") AND ("remediation" OR "decontamination" OR "environmental monitoring")).

String para a base WOS: TS=(("radionuclides" OR "radioactive elements" OR "radioisotopes") AND ("environmental contamination" OR "radioactive contamination" OR "environmental pollution") AND ("environmental impact" OR "ecotoxicology" OR "bioaccumulation" OR "environmental exposure") AND ("remediation" OR "decontamination" OR "environmental monitoring")).

Em ambas as bases foi aplicado o filtro para extração de estudos de livre acesso (Open Access). Após a aplicação do filtro, a busca na Scopus retornou 46 publicações, enquanto na WOS resultou 6 estudos, totalizando 52 fontes de evidência. Foram encontrados 2 estudos duplicados, restando 50 fontes. A triagem foi realizada em duas etapas, sendo a primeira pela leitura de títulos e resumos das fontes selecionadas e a segunda pela análise do texto completo dos estudos restantes. Critérios de inclusão e exclusão:

- Foram incluídos apenas artigos e excluídas as publicações por outros meios, tais como, apresentações em seminários, capítulos de livro, entre outros;
- Foram excluídos artigos com tópicos não relacionados ao objetivo desta revisão;
- Também foram excluídos os estudos que não estavam na língua inglesa ou português.

Após a leitura de títulos e resumos, 17 fontes foram excluídas, restando 33 estudos para leitura completa. Desses, um foi removido por não estar disponível em inglês ou português, e outros três, embora classificados como de livre acesso, não puderam ser obtidos. Assim, 29 estudos permaneceram para leitura integral.

3. RESULTADOS e DISCUSSÃO

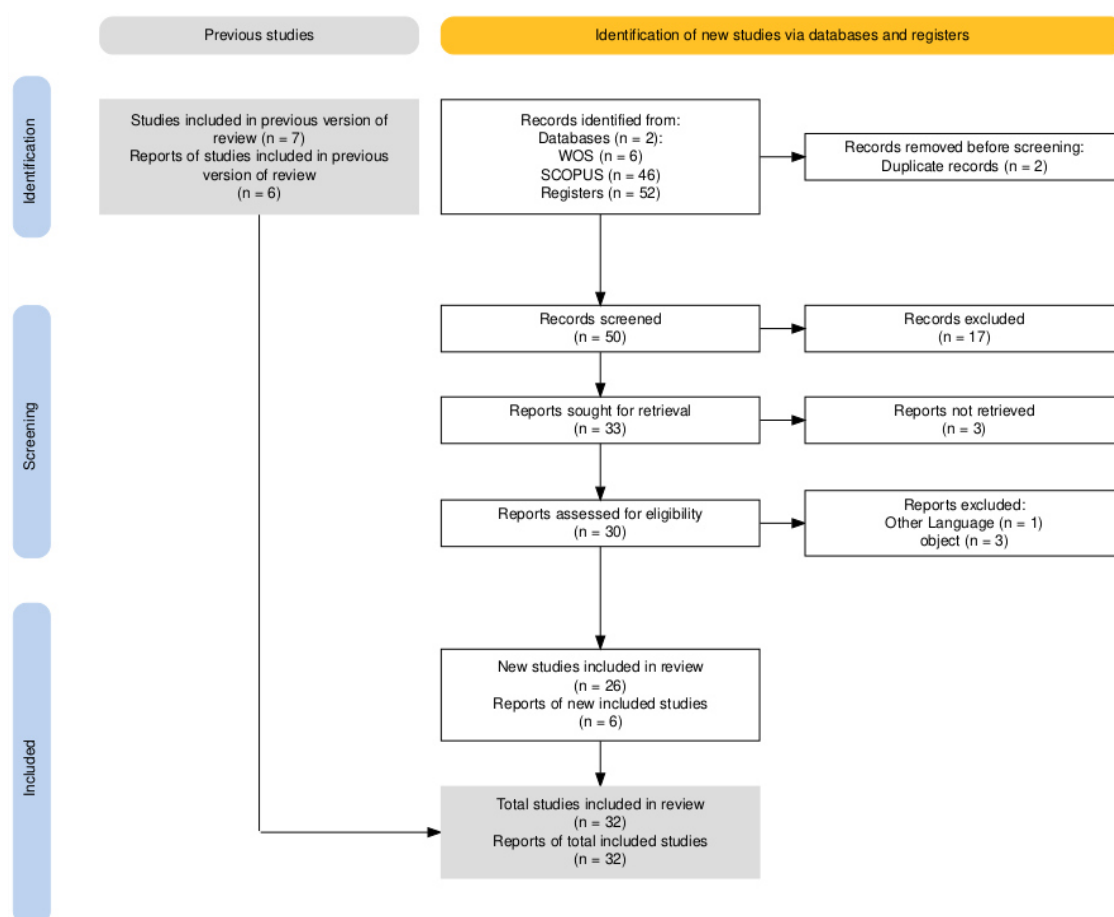
Esta seção apresenta o resultado das buscas e triagem dessa revisão de escopo. Em seguida, elabora a Tabela síntese e discute sobre as fontes selecionadas.

3.1. Resultados

Após a leitura completa foi decidido manter 26 fontes. Além destes 26 trabalhos foram acrescentados 6 artigos lidos durante a busca preliminar às buscas desta revisão, totalizando 32 artigos selecionados. Os artigos incluídos foram: Beccia *et al.* (2022); Hinton *et al.* (2007); Beresford, Scott e Copplestone (2020); Buesseler, Aoyama e Fukasawa (2011); Fernandes *et al.* (2006); e Galhardi *et al.* (2017). Os estudos de Hirose *et al.*¹, Kuo *et al.*² e Zamostian *et al.*³ foram retirados por abordarem apenas um dos aspectos do mapeamento: fontes de contaminação, dispersão, bioacumulação, os impactos ambientais e as estratégias de remediação.

O processo encontra-se apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma PRISMA-ScR



Fonte: Os autores.

1 Estudo excluído da revisão após leitura completa: HIROSE, Katsumi *et al.* Plutonium in sea waters of the western North Pacific. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 248, n. 3, p. 771-776, 2001.

2 Estudo após a leitura completa: KUO, Li-Jung et al. A centennial record of anthropogenic impacts and extreme weather events in southwestern Taiwan: Evidence from sedimentary molecular markers in coastal margin. **Marine pollution bulletin**, v. 86, n. 1-2, p. 244-253, 2014.

3 Excluído após a leitura completa: ZAMOSTIAN, Pavlo et al.. Influence of various factors on individual radiation exposure from the Chernobyl disaster. **Environmental Health: A Global Access Science Source**.

Uma breve análise descritiva foi realizada com os metadados dos 50 estudos coletados e já deduplicados. Os resultados estão representados nas Figuras e Tabelas desta subseção. A Tabela 1 e a Figura 2 exibem os países que apresentaram maior produção.

Tabela 1 – 10 países com maior produção.

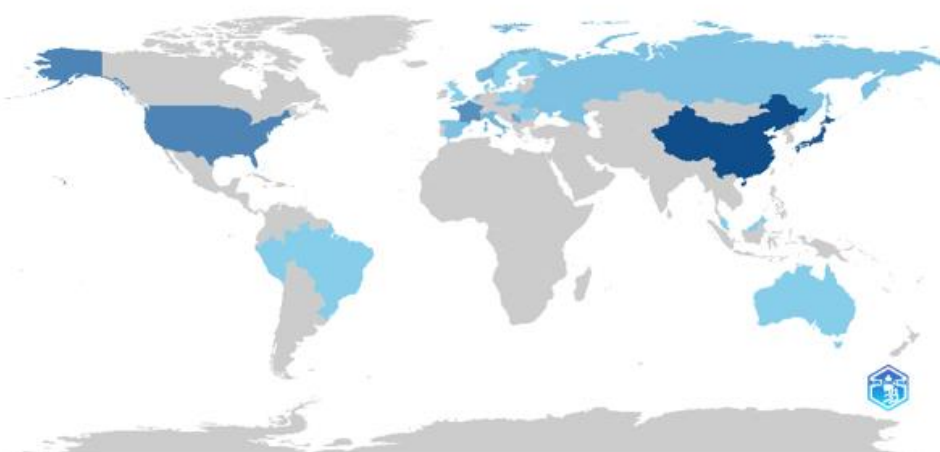
10 Países com maior produção	
País	Frequência
CHINA	12
JAPAN	11

USA	7
FRANCE	6
SERBIA	4
ITALY	3
NORWAY	3
BELARUS	2
CZECH REPUBLIC	2
NETHERLANDS	2

Fonte: Os autores.

Figura 2 - Países com maior produção no tema

Country Scientific Production



Fonte: Os autores.

A Tabela 2 exibe as instituições com maior produção no tema, enquanto a Figura 3 indica as palavras-chave mais utilizadas. A Tabela 3 mostra os estudos mais citados e a Tabela 4 apresenta os periódicos mais relevantes.

Tabela 2 – Instituições/Universidades com maior produção

Afiliações/Universidades com maior produção na temática	Coluna1
Afiliação	Artigos
CITY UNIV HONG KONG	5
UNIVERSITY OF GEORGIA	5
NAGASAKI UNIVERSITY	3
NATIONAL SUN YAT-SEN UNIVERSITY	3



REVISÃO DE ESCOPO PARA O PANORAMA DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DE RADIONUCLÍDEOS: FONTES, DISPERSÃO, BIOACUMULAÇÃO E ESTRATÉGIAS DE REMEDIAÇÃO

Sales et al. (2026)

NORWEGIAN UNIVERSITY OF LIFE SCIENCES	3
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN	3
UNIVERSITY OF TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO	3
AARHUS UNIVERSITY	2
BEIJING RES CTR AGRIFOOD TESTING AND FARMLAND MONIT	2
CZECH UNIV LIFE SCI PRAGUE	2

Fonte: Os autores.

Figura 3 - Nuvem de frequência de palavras-chave



Fonte: Os autores.

Tabela 3 - Estudos mais citados

Estudos	Citações
BAILLY D B P, 2012, J ENVIRON RADIOACT	216
PRÁVĚLIE R, 2014, AMBIO	134
YOSHIHARA T, 2013, J ENVIRON RADIOACT	83
LIND O, 2007, SCI TOTAL ENVIRON	64
FALANDYSZ J, 2015, APPL MICROBIOL BIOTECHNOL	58
ALAM L, 2011, ENVIRON HEALTH GLOBAL ACCESS	51
SCI SOUR	51
BRÈCHIGNAC F, 2009, J ENVIRON RADIOACT	43
HIROSE K, 2001, J RADIOANAL NUCL CHEM	42
KOENIG K, 2008, AM J EMERG MED	37
NEMOTO Y, 2018, PLOS ONE	34

Fonte: Os autores.

Tabela 4 - Fontes/Periódicos mais relevantes

Periódicos/Fontes	Artigos
JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY	7
PLOS ONE	5

SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT	4
ENVIRONMENTAL POLLUTION	3
ECOTOXICOLOGY AND ENVIRONMENTAL SAFETY	2
ENVIRONMENTAL HEALTH: A GLOBAL ACCESS SCIENCE SOURCE	2
ENVIRONMENTAL MONITORING AND ASSESSMENT	2
ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY	2
HEMIJSKA INDUSTRIJA	2
INTERNATIONAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RESEARCH AND PUBLIC HEALTH	2

Fonte: Os autores.

3.2. Tabela Síntese de Evidências e Achados Principais

A Tabela síntese identifica e evidencia as características dos estudos selecionados.

Tabela Síntese de Evidências 1 – Identificação dos Estudos e PCC

Identificação dos Estudos				População; Conceito; Contexto		
Autor/Ano	País	Objetivo	Tipo de Estudo	População/ Ambiente	Conceito Investigado	Contexto
Alam e Mohamed, 2011	Malásia	Estimar concentrações de ²¹⁰ Po em organismos marinhos e avaliar o impacto em consumidores.	Pesquisa de campo e laboratorial.	Peixes, crustáceos e moluscos. Área costeira de Kapar (perto de usina a carvão).	Acúmulo de radionuclídeo natural ²¹⁰ Po	Impacto da indústria de energia a carvão no ambiente marinho.
Akiyama et al. 2015	Japão	Avaliar a contaminação radioativa interna em residentes ao sul da usina nuclear de Fukushima ou evacuados para Iwaki.	Programa de triagem de exposição à radiação interna via contador de corpo inteiro (WBC).	9.206 voluntários, incluindo 6.446 crianças (4 a 15 anos) e 2.760 adultos. Áreas ao sul da usina nuclear de Fukushima Daiichi (Hospital Jyoban em Iwaki).	Exposição interna a radionuclídeos (Cs134 e Cs137) provenientes do desastre nuclear.	Monitoramento de saúde pública iniciado um ano após o desastre nuclear de Fukushima.
Bailly du Bois et al. 2012	Japão	Estimar a liberação marinha de radionuclídeos após o acidente de Fukushima.	Modelagem e avaliação ambiental.	Água do mar e sedimentos. Ambiente marinho costeiro de Fukushima.	Termo de fonte marinho e dispersão de Cs137.	Consequências imediatas e monitoramento pós-acidente nuclear.

Beccia, M. R. et al. 2022	França	Discutir a evolução metodológica na química ambiental de radionuclídeos, focando na especiação em níveis de ultra-traço.	Perspectiva / Metodológico.	Radionuclídeos (U, Np, Pu, Cs, Am) e espécies sentinelas como o ouriço-do-mar. Marinho e terrestre (sedimentos e solos).	Especiação química e coordenação molecular em escala de ultra-traço.	Gestão de resíduos nucleares e impactos ambientais pós-acidentes.
Beresford, N. A. et al. 2020	Reino Unido	Analisar as razões para a falta de consenso sobre os impactos de longo prazo da radiação na vida selvagem em Chernobyl.	Revisão Crítica e Análise Metodológica.	Vida selvagem variada (mamíferos, aves, insetos e invertebrados). Zona de Exclusão de Chernobyl (Ucrânia e Bielorrússia).	Metodologia de estimativa de dose, rigor estatístico e o "efeito memória" de doses passadas.	30 anos pós-Chernobyl e a integração da proteção ambiental no processo regulatório.
Brown et al. 2022	Estados Unidos da América	Investigar a bioacumulação de Hg e Cs137 e seus efeitos subletais em cobras.	Estudo ecotoxicológico de campo.	Cobras d'água (<i>Nerodia floridana</i>). Reservatórios de resfriamento nuclear (Savannah River Site).	Bioacumulação e indicadores de saúde subletais.	Monitoramento de contaminantes legados em bioindicadores répteis.
Buesseler et al. (2011)	Japão	Caracterizar impactos de Fukushima no oceano e avaliar doses	Monitoramento e Análise de Dados	Ambiente marinho (Água, sedimentos e pescados)	Dispersão de Cs e I e bioacumulação	acidente Usina Fukushima (2011)
Carneiro et al. 2014	Portugal	Monitorar poluição ambiental por metais pesados em aves de rapina.	Biomonitoramento.	Águias-de-asa-redonda (<i>Buteo buteo</i>). Regiões litorais e interiores de Portugal.	Acúmulo de As, Cd, Pb e Hg em tecidos.	Uso de espécies sentinelas para avaliar a exposição crônica a metais.
Chernysh et al. 2024	Ucrânia / Rep. Tcheca	Revisar problemas de reabilitação de ecossistemas e processos de biorremediação.	Revisão bibliográfica sistemática.	Microrganismos (bactérias) e sistemas solo-planta. Solos contaminados por metais e radionuclídeos.	Biorremediação e bioassorção de contaminantes.	Estratégias para recuperação de territórios radioativamente degradados.
De Meutter et al. 2021	Ucrânia/ Europa	Avaliar a radioatividade liberada por incêndios florestais em Chernobyl em 2020.	Modelagem atmosférica e avaliação de dados.	Atmosfera e população humana (avaliação de risco). Zona de exclusão de Chernobyl e transporte	Ressuspensão atmosférica de Cs137 por biomassa.	Impacto radiológico de eventos climáticos em áreas contaminadas.

				transfronteiriço		
Falandysz et al. 2015	Global	Investigar concentrações de Cs137 e K40 em cogumelos comestíveis.	Estudo radiométrico e de campo.	Cogumelos do gênero <i>Boletus</i> . Ecossistemas florestais em vários continentes.	Bioacumulação de radiocésio em fungos.	Segurança alimentar e impacto de precipitação nuclear histórica.
Fernandes et al. (2006)	Brasil	Caracterização radioecológica de mina de urânio em região semiárida	Experimental / Caracterização	Solo, águas subterrâneas e vegetais	Fatores de transferência solo-planta	Mineração e beneficiamento de urânio
Fujishima et al. 2021	Japão	Investigar deposição de radiocésio em órgãos reprodutivos de gatos.	Estudo observacional de campo.	Gatos domésticos livres (<i>Felis catus</i>). Áreas de Fukushima com diferentes níveis de descontaminação.	Transferência de 137Cs e impacto em órgãos reprodutivos.	Saúde animal e controle populacional em zonas pós-acidente nuclear.
Fuller et al. 2017	Bielorrússia / Ucrânia	Avaliar impactos da radiação na estabilidade do desenvolvimento de crustáceos.	Estudo ecotoxicológico de campo.	Piolho-d'água (<i>Asellus aquaticus</i>). Lagos de água doce ao redor de Chernobyl.	Assimetria flutuante como indicador de estresse radiológico.	Efeitos biológicos de longo prazo da radiação crônica.
Galhardi et al. (2017)	Brasil (Figueira, PR)	Avaliar radionuclídeos em solos/vegetais sob influência de carvão	Experimental / Biomonitoramento	Soja, trigo, pinus, eucalipto e solos	Bioacumulação e Drenagem ácida de Mina	Mineração de carvão e usina termelétrica
Hinton, T. G. et al. 2007	Multinacional (12 países, incluindo Bielorrússia, Rússia e Ucrânia)	Estabelecer um consenso sobre as consequências ambientais e efeitos bióticos da radiação de Chernobyl.	Revisão de Consenso (Chernobyl)	Biota não humana: plantas, invertebrados do solo, vertebrados terrestres e peixes. Zona de Exclusão de 30 km de Chernobyl.	Efeitos radioinduzidos agudos e crônicos e o impacto do abandono humano na biota.	Revisão de 20 anos do acidente de Chernobyl para dissipar incertezas científicas.
Ishii et al. 2017	Japão	Compreender a transferência de radiocésio na teia alimentar de insetos	Estudo de campo e ecologia trófica.	Comunidades de insetos florestais. Ecossistemas florestais de Fukushima e Ibaraki.	Razão de concentração (CR) e transferência trófica.	Impacto ecológico da radioatividade em cadeias alimentares terrestres.

Kazzi et al. 2015	EUA / Brasil / UK	Discutir o manejo clínico de pacientes internamente contaminados.	Revisão clínica e de protocolos.	Pacientes humanos contaminados. Ambiente hospitalar (emergência).	Descontaminação interna e terapia com agentes quelantes.	Preparação médica para emergências radiológicas e nucleares.
Koenig et al. 2008	EUA	Discutir a descontaminação hospitalar de vítimas de agentes QBR.	Revisão de diretrizes de gestão de saúde.	Vítimas de incidentes químicos, biológicos e radiológicos. Instalações de cuidados de saúde.	Protocolos de descontaminação hospitalar e segurança do staff	Planejamento de desastres e resposta a armas de destruição em massa.
Leaphart et al. 2022	EUA	Determinar taxas de bioacumulação de Hg e ¹³⁷ Cs em aves aquáticas.	Estudo experimental de campo e laboratorial.	Patos selvagens (Anas platyrhynchos). Pântanos contaminados (Savannah River Site).	Cinética de bioacumulação e uso do sangue como matriz indicadora.	Gestão e monitoramento de riscos em espécies migratórias de caça.
Lind et al. (2007)	Espanha e Groenlândia	Caracterizar partículas de U/Pu de acidentes nucleares	Experimental	Solo e sedimentos	Especiação e estados de oxidação	Acidentes com armas nucleares (B-52)
Magre (2023)	França	Identificar origem do radiocésio via assinaturas isotópicas	Experimental	Solo e sedimentos lacustres	Assinatura ¹³⁵ Cs/ ¹³⁷ Cs como ferramenta de fonte	Fallout global e Chernobyl
Malek et al. (2004)	Japão	Investigar remoção de ¹³⁷ Cs em peixes na culinária	Experimental	Bagre japonês / Ambiente aquático	Descontaminação culinária de ¹³⁷ Cs	Radioatividade em ambientes aquáticos
Nakamura et al. (2022)	Japão	Analisar monitoramento de radiocésio em alimentos	Análise de dados	Alimentos diversos	Níveis de ¹³⁴ , ¹³⁷ Cs e conformidade com limites	Pós-acidente de Fukushima
Pravalié (2014)	Global	Analisar testes nucleares e consequências globais	Revisão	Atmosfera, oceanos e biosfera terrestre	Impacto da poluição por isótopos (¹⁴ C, ¹³⁷ Cs, ⁹⁰ Sr, ¹³¹ I)	Corrida armamentista nuclear
Strzalek et al. (2021)	Polônia	Avaliar ¹³⁷ Cs e ⁴⁰ K em ecossistemas florestais	Experimental	Madeira, serapilheira e solo florestal	Contaminação e coeficientes de transferência	Legado de testes e Chernobyl

Tsuchiya et al. (2017)	Japão	Avaliar doses de exposição interna em plantas silvestres	Experimental	Plantas silvestres comestíveis e residentes	Risco de exposição via produtos florestais	Reconstrução pós-Fukushima
Varley et al. (2017)	Bielorrússia	Desenvolver método in situ para mapeamento de ¹³⁷ Cs	Metodológico	Solo	Modelos de distribuição vertical de ¹³⁷ Cs	Ambiente contaminado pós-Chernobyl
Takata et al. (2019)	Japão	Determinar reequilíbrio de ¹³⁷ Cs na biota marinha	Monitoramento	Biota marinha e água do mar	Razões de concentração (CR) e meia-vida de recessão	Resposta de sistemas marinhos a liberações
Yoshihara et al. (2012)	Japão	Medir deposição de radiocésio em árvores	Experimental	20 espécies de árvores e solos	Interceptação foliar e taxas de dose gama	Estágio inicial pós-Fukushima
Yang et al. (2023)	Hong Kong	Explorar "Mexilhões Artificiais" para monitoramento	Experimental	Ambiente marinho simulado	Amostragem passiva e bioacumulação de U, Sr, Cs	Busca por métodos práticos de monitoramento
Zvonova et al. (2010)	Rússia	Validar modelos de transferência de ¹³¹ I e doses	Revisão/Modelagem	Habitantes e gado leiteiro	Modelagem de transporte de iodo e carga na tireoide	Radioecologia pós-Chernobyl

Fonte: Os autores.

Tabela Síntese de Evidências 2 – Achados Principais

Autor/Ano	Fontes de Contaminação	Meios de Dispersão	Impacto Ambiental Relatado	Impacto à Saúde	Estratégias de Remediação	Principais Achados e ODS
Alam e Mohamed 2011	Usina termoeletrica a carvão.	Água do mar e sedimentos particulados.	Acúmulo de ²¹⁰ Po em tecidos de organismos marinhos (peixes, crustáceos, moluscos).	Risco de câncer por ingestão de frutos do mar contaminados.	Monitoramento radiológico contínuo.	Moluscos (Anadara granosa) apresentam maior fator de concentração de ²¹⁰ Po. ODS 14 (Vida na Água)
Akiyama et al. 2015	Radionuclídeos Cs134 e Cs137 liberados da usina nuclear de Fukushima Daiichi após o terremoto de 2011.	Ingestão de alimentos e água contaminados e, inicialmente, inalação de partículas.	Radio-contaminação de solos e ecossistemas ao redor da usina, incluindo produtos	Risco de exposição interna à radiação e potenciais efeitos crônicos (tumores);	Programas de triagem por contador de corpo inteiro (WBC), intervenção dietética (alimentos	Os níveis de contaminação interna foram mínimos e negligenciáveis, ficando muito abaixo do limite governamental

			cultivados localmente.	impactos na saúde mental e aumento de doenças não transmissíveis por medo e sedentarismo.	inspecionados) e educação pública.	de 1 mSv/ano. ODS 3 (Saúde) e ODS 2 (Segurança Alimentar).
Bailly du Bois et al. 2012	Acidente na usina nuclear de Fukushima Dai-ichi.	Deposição atmosférica, liberação direta de água contaminada e lixiviação do solo.	Maior fluxo de liberação radioativa artificial para o mar já conhecido.	Risco de exposição à radiação via cadeia alimentar marinha.	Monitoramento de longo prazo das áreas costeiras.	Estima-se liberação de PBq27 de Cs137 até julho de 2011. ODS 14 (Vida na Água)
Beccia, M. R. et al. 2022	Fissão nuclear, indústria militar/civil, acidentes (Chernobyl, Fukushima) e gestão de resíduos.	Água (fluxo marinho e rios), sedimentos, solos e transporte por lixiviação.	Bioacumulação em espécies marinhas (algas e ouriços-do-mar); ligação de urânio a biomoléculas celulares.	Riscos de toxicidade e radiotoxicidade em caso de exposição acidental ou falha em resíduos.	Uso de agentes quelantes para decorporação humana e gestão física/química de locais contaminados.	A especiação química em ultra-traço é fundamental para entender a migração e o acúmulo de radionuclídeos. ODS 7 (Energia Limpa), ODS 14 (Vida na Água).
Beresford, N. A. et al. 2020	Radionuclídeos de Chernobyl (Cs-137, Sr-90, Am-241 e Plutônio).	Deposição atmosférica heterogênea baseada em padrões climáticos históricos.	Debate sobre a redução na abundância de insetos e aranhas; alterações na decomposição de matéria orgânica.	Foco na proteção ambiental como base para definir benchmarks de segurança para a biota e humanos.	Gestão da Zona de Exclusão; necessidade de rigor estatístico e avaliação precisa de doses internas/externas.	Falta de consenso científico sobre efeitos em baixas doses; importância do "efeito memória" das doses altas do passado. ODS 9 (Indústria e Inovação), ODS 15 (Vida Terrestre).
Brown et al. 2022	Legado de produção de energia nuclear e armas; queima de carvão.	Reservatórios de resfriamento nuclear e sedimentos aquáticos.	Bioacumulação de Hg e Cs137 em cobras d'água.	Potencial toxicidade crônica em predadores de topo.	Uso de bioindicadores (cobras) para monitoramento local.	Aumento de contaminantes correlacionado ao tamanho do corpo das cobras. ODS 15 (Vida Terrestre)
Buesseler et al. (2011)	Descargas diretas, águas subterrâneas e fallout	Correntes oceânicas (Kuroshio/Oyashio) e misturas	Elevado ¹³⁷ Cs e bioacumulação em enguias e algas	Dose interna via consumo de pescados	Monitoramento e restrição de pesca	Maior fonte acidental de radionuclídeos para o oceano. ODS 3, 14

Carneiro et al. 2014	Atividades antropogênicas, tráfego rodoviário e caça.	Solo, ar e ingestão de presas (cadeia trófica).	Exposição crônica de aves de rapina a metais pesados (As, Cd, Pb, Hg).	Risco de toxicidade sistêmica em animais e humanos.	Biomonitoramento contínuo com espécies sentinelas.	Rins apresentam as maiores concentrações de metais pesados acumulados. ODS 15 (Vida Terrestre)
Chernysh et al. 2024	Extração mineral, fertilizantes, queima de combustíveis fósseis e acidentes nucleares.	Migração solo-planta-animal-humano.	Disrupção da homeostase de ecossistemas terrestres.	Câncer e anormalidades metabólicas.	Biorremediação, biomineralização e uso de fosfogesso.	Tecnologias de bio sorção bacteriana são promissoras para solos. ODS 15 (Vida Terrestre)
De Meutter et al. 2021	Incêndios florestais na Zona de Exclusão de Chernobyl (2020).	Ressuspensão atmosférica e transporte transfronteiriço.	Reintrodução de partículas radioativas históricas na atmosfera.	Preocupação com inalação de partículas por populações europeias.	Modelagem de transporte atmosférico e monitoramento via satélite.	Incêndios liberaram cerca de 600 GBq de Cs137 na atmosfera. 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), 15 (Vida Terrestre)
Falandysz et al. 2015	Precipitação nuclear histórica (Fallout).	Micélios fúngicos no solo florestal.	Bioacumulação extrema de radiocésio em cogumelos comestíveis.	Exposição radiológica interna via dieta.	Campanhas governamentais de medição de alimentos.	Cogumelos do gênero Boletus são potentes acumuladores de Cs137. 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), 15 (Vida Terrestre)
Fernandes et al. (2006)	Rejeitos, pilhas de minério e exalação de radônio	Transporte aéreo e complexação por carbonatos em águas	Acúmulo de rádio em mandioca e 210Pb em pasto	Ingestão de vegetais e leite	Gerenciamento de pilhas e monitoramento de poços	Semiárido reduz lixiviação física, mas carbonatos aumentam a solubilidade. ODS 3, 6, 15
Fujishima et al. 2021	Acidente de Fukushima Dai-ichi.	Solo contaminado e ingestão de alimentos locais.	Deposição de radiocésio em órgãos internos de mamíferos.	Potencial risco à saúde reprodutiva animal.	Descontaminação do solo e controle populacional (TNVR).	Cs137 é transferido da gata para fetos através da placenta. 3(Saúde e Bem-Estar), 15 (Vida Terrestre)
Fuller et al. 2017	Fallout do acidente de Chernobyl (1986).	Água doce e sedimentos de lagos.	Estresse radiológico crônico em invertebrados aquáticos.	Efeitos citogenéticos e biológicos de longo prazo.	Monitoramento de biodiversidade e estabilidade de desenvolvimento.	Radiação crônica impacta a estabilidade do desenvolvimento de crustáceos. 14 (Vida na Água)
Ishii et al. 2017	Acidente de Fukushima Dai-ichi.	Serapilheira florestal e detritos.	Transferência de Cs137 através da	Exposição por irradiação	Monitoramento de cadeias	Insetos detritívoros têm maior

			teia alimentar de insetos.	externa e ingestão.	tróficas terrestres.	concentração de Cs137 que herbívoros. 15 (Vida Terrestre)
Hinton, T. G. et al. 2007	Acidente na usina nuclear de Chernobyl (Reator 4).	Nuvem de contaminação (gases), chuva (wash-off), bioacumulação e transporte físico/químico.	Mortalidade de pinheiros ("Floresta Vermelha"), redução de invertebrados e anomalias genéticas em aves.	Exposição de tireoides de vertebrados a iodo radioativo; preocupações com riscos ocupacionais e ambientais.	Criação de zonas de exclusão (30 km), abandono humano e reflorestamento natural.	A ausência humana permitiu que a zona se tornasse um santuário; o impacto positivo da retirada humana superou a radiação para muitas espécies. ODS 3 (Saúde e Bem-Estar), ODS 15 (Vida Terrestre).
Galhardi et al. (2017)	Rejeitos de carvão (DAM) e cinzas de termelétrica	Drenagem ácida e deposição atmosférica seca/úmida	Acidificação e TFs de urânio acima dos limites	Transferência para cadeia alimentar (soja/trigo)	Biomonitoramento e controle de efluentes	Desequilíbrio 234U/238U indica fontes antrópicas. ODS 2, 3, 15
Kazzi et al. 2015	Disseminação acidental ou intencional de material radioativo.	Inalação, ingestão ou absorção cutânea.	Contaminação interna por radionuclídeos.	Síndrome Aguda da Radiação (ARS) e câncer.	Terapia com agentes quelantes (Azul da Prússia, DTPA).	Manejo clínico rápido é essencial para reduzir a dose interna. 3 (Saúde e Bem-Estar)
Koenig et al. 2008	Incidentes químicos, biológicos e radiológicos (QBR).	Contato direto e vapores retidos em vestimentas.	Dispersão secundária de contaminantes perigosos.	Lesões agudas por agentes químicos e radiológicos.	Protocolos hospitalares de "Despir e Lavar" (Strip and shower).	A água morna é o material de escolha para descontaminação de vítimas. ODS 3 (Saúde e Bem-Estar), ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis)
Leaphart et al. 2022	Legado de contaminação industrial e nuclear.	Pântanos e ecossistemas de zonas úmidas.	Bioacumulação rápida de Hg e Cs137 em aves migratórias.	Risco para humanos que consomem aves de caça.	Amostragem não destrutiva (sangue) para monitoramento.	Patos-reais acumulam contaminantes em taxas consistentes ao longo do tempo. 15 (Vida Terrestre)
Lind et al. (2007)	Acidentes com armas nucleares	Dispersão de partículas e lixiviação	Persistência de partículas por décadas	Risco de exposição interna via solo	Caracterização mineralógica	Oxidação do urânio e plutônio determina a solubilidade de partículas. ODS 14, 15

Magre (2023)	Testes nucleares e acidente de Chernobyl	Transporte atmosférico e fallout global	Acúmulo em solos e sedimentos de montanha	Exposição à radiação artificial de longo prazo	Monitoramento para distinguir fontes históricas	isótopo ¹³⁵ Cs permite distinguir Chernobyl de fallout global. ODS 3, 15
Malek et al. (2004)	Testes, acidentes e efluentes	Escoamento superficial de águas pluviais para rios e mares	transferência para a Biota aquática. Bioacumulação em peixes de água doce	Ingestão de radionuclídeos via cadeia alimentar	Descontaminação culinária (cozimento) para reduzir a ingestão	O cozimento reduz ¹³⁷ Cs significativamente e em alimentos. ODS 2, 3
Nakamura et al. (2022)	Acidente da usina nuclear de Fukushima	Ciclo ressuspensão, deposição e correntes oceânicas	Contaminação de redes terrestres e aquáticas alimentares	Dose interna através do consumo	plano de Monitoramento de higiene e restrições de embarque	Espécies selvagens requerem atenção. ODS 2, 3
Pravalić (2014)	Testes nucleares diversos	Injeção estratosférica, fluxos fluviais e ciclos de gases oceano-atmosfera	Contaminação global persistente e bioacumulação marinha e ecossistemas florestais	aumento do Câncer de tireoide (especialmente por ¹³¹ I)	Tratados de proibição (CTBT) e descontaminação	O ¹⁴ C é o maior contribuinte para a dose coletiva de longo prazo. ODS 3, 14, 15
Strzalek et al. (2021)	Testes nucleares e Chernobyl	Fallout depositado em serapilheira e solo	Retenção prolongada e reciclagem florestal	Segurança radiológica de produtos florestais	árvores como bioindicadores de contaminação passada	Fallout de testes nucleares causou contaminação 30 vezes maior que Chernobyl. ODS 15
Tsuchiya et al. (2017)	Acidente de Fukushima	Lixiviação por chuva e absorção por raízes rasas em florestas	Níveis altos em cogumelos e plantas silvestres comestíveis	Risco de exposição interna e estresse psicológico na população	Restrição de ingestão de espécies; descontaminação florestal	Plantas como Koshiabura excedem limites de contaminação. ODS 3
Varley et al. (2017)	Acidente de Chernobyl	Deposição, seca e migração vertical no solo ao longo de décadas	Heterogeneidade espacial extrema; permanência em camadas superficiais do solo	Risco à saúde humana por ¹³⁷ Cs, ⁹⁰ Sr e Pu	Mapeamento in situ para apoiar remediações	Espectrometria in situ substitui amostragem laboratorial tediosa com precisão. ODS 3, 15
Takata et al. (2019)	Fallout de Fukushima	Descarga direta no mar, escoamento terrestre e dispersão oceânica	Desequilíbrio na biota marinha; contaminação de peixes demersais	Segurança de produtos pesqueiros	Monitoramento sistemático para prever o retorno ao estado de equilíbrio	meia-vida efetiva de ¹³⁷ Cs na biota de 100 a 1100 dias. ODS 14

Yoshihara et al. (2012)	Acidente de Fukushima	Fallout atmosférico interceptado por copas de árvores	Espécies perenes interceptam 7,7 vezes mais cézio	Risco de Radiação externa e interna em jardins e áreas florestais	programas de Manejo florestal e eliminação de nuclídeos	Árvores funcionam como blindagem e acumuladores. ODS 15
Yang et al. (2023)	Mineração e usinas nucleares	Liberção em corpos d'água e bioacumulação	Ameaça ambiental aquática	Exposição via ingestão de água e alimentos	Uso de "Mexilhões Artificiais" para monitoramento	AMs concentram nuclídeos eficientemente em baixas concentrações. ODS 14
Zvonova et al. (2010)	Acidente de Chernobyl	Passagem de nuvem e deposição mista	Contaminação de pastagens	Acúmulo de ¹³¹ I na tireoide via leite	Manter gado em ambientes fechados para minimizar ingestão	O tempo de movimentação das vacas para o pasto é o fator crítico para a dose humana. ODS 3

Fonte: Os autores.

3.3 Discussão

3.3.1 Fontes de contaminação e dispersão ambiental

A utilização de radionuclídeos, átomos com núcleos instáveis, como ferramentas de datação, *fingerprinting* temporal, tem possibilitado reconstruir a história de impactos antropogênicos e eventos naturais em diferentes ecossistemas. Em sedimentos costeiros de Taiwan, Kuo *et al.* (2014) demonstraram que os radionuclídeos ¹³⁷Cs e ²¹⁰Pb atuam como cronômetros sedimentares de elevada precisão, permitindo identificar camadas deposicionais e reconstruir registros ambientais associados à urbanização, industrialização e eventos climáticos extremos ao longo do último século.

Além da aplicação como marcadores cronológicos, os radionuclídeos apresentam comportamentos ambientais distintos, determinados principalmente por suas propriedades físico-químicas, como solubilidade, adsorção às partículas e mobilidade nos diferentes compartimentos ambientais. Assim, a dispersão de radionuclídeos no meio marinho é influenciada tanto pela solubilidade quanto pela afinidade com partículas em suspensão.

Paralelamente, estudos sobre o inventário de precipitação radioativa histórica oriunda dos testes de armas nucleares atmosféricos realizados no século XX, como o mapeamento conduzido por Strzałek *et al.* (2021) na Polônia, revelam que a deposição de emissores beta na década de 1960 superou significativamente aquela gerada por acidentes subsequentes, como a catástrofe de Chernobyl, servindo as florestas como eficientes arquivos temporais de longo prazo. Sob uma perspectiva global, o radionuclídeo cosmogênico carbono-14 (^{14}C), produzido em larga escala por esses ensaios militares e rapidamente oxidado a $^{14}\text{CO}_2$, atuou como um marcador cronológico planetário ao ser assimilado progressivamente pelos reservatórios globais de carbono, incluindo a biosfera terrestre e a superfície dos oceanos, onde sua deposição em bivalves marinhos como a *Arctica islandica* possibilitou a reconstrução de suas flutuações e dinâmica de transferência decenal (Pravalie *et al.*, 2014).

Enquanto o radiocésio (^{137}Cs) permanece predominantemente na fase dissolvida, facilitando seu transporte por correntes oceânicas de grande escala, como a corrente de Kuroshio (Du Bois *et al.*, 2012), o plutônio (Pu) apresenta comportamento distinto, sendo fortemente adsorvido às partículas suspensas e posteriormente transferido para os sedimentos por meio do processo de scavenging, depuração por partículas. Entretanto, Hirose *et al.* (2001) observaram que, embora parte significativa do plutônio seja removida da superfície, uma fração permanece na camada de mistura superficial por períodos superiores aos previstos, em decorrência dos processos de mistura vertical e recirculação oceânica. Esses resultados evidenciam que os sedimentos atuam simultaneamente como reservatórios e fontes secundárias de radionuclídeos, permitindo sua eventual remobilização para a coluna d'água.

Cabe destacar que os estudos de Hirose *et al.* (2001) e Kuo *et al.* (2014) foram utilizados como referências secundárias de embasamento teórico para contextualizar o comportamento ambiental dos radionuclídeos e exemplificar aplicações consolidadas desses elementos em estudos ambientais. Embora sejam trabalhos clássicos e amplamente reconhecidos na literatura, seus objetivos não se enquadram diretamente na questão norteadora desta revisão de escopo, que buscou sintetizar evidências sobre as fontes de contaminação, dispersão ambiental, bioacumulação, impactos ambientais e estratégias de remediação de radionuclídeos. Dessa forma, esses estudos não compõem o conjunto de

artigos selecionados na revisão nem foram incluídos nas Tabelas de síntese das evidências, sendo citados exclusivamente para complementar a fundamentação teórica e subsidiar a interpretação dos resultados obtidos.

De modo geral, a literatura analisada apresenta caráter interdisciplinar, abrangendo estudos de radioecologia, biogeoquímica, oceanografia, ecotoxicologia, saúde ambiental e monitoramento ambiental, com predominância de pesquisas voltadas ao comportamento do radiocésio no ambiente.

Os estudos de Alam e Mohamed (2011), De Meutter *et al.* (2021), Ishii, Hayashi e Takamura *et al.* (2017), Malek, Nakahara e Nakamura (2004), Varley *et al.* (2017), Právělie (2014) e Strzałek *et al.* (2021) identificam o radiocésio (^{137}Cs) como o principal radionuclídeo de interesse ambiental, principalmente em razão de sua elevada meia-vida física, aproximadamente 30 anos, elevada mobilidade ambiental e persistência em ecossistemas terrestres e aquáticos.

As principais fontes antrópicas de liberação de radiocésio identificadas nos estudos incluem acidentes em usinas nucleares, como Chernobyl (1986) e Fukushima Daiichi (2011), além dos testes atmosféricos de armas nucleares realizados durante o século XX. Nesse contexto, a razão isotópica entre ^{135}Cs e ^{137}Cs constitui uma importante ferramenta de *fingerprinting* isotópico, permitindo diferenciar as diversas fontes de contaminação e reconstruir a origem do radionuclídeo presente no ambiente (Lind *et al.*, 2007; Magre, 2023).

Essa abordagem representa um avanço significativo para o monitoramento ambiental, pois possibilita distinguir radionuclídeos provenientes de acidentes nucleares daqueles originados de precipitação global decorrente dos testes nucleares atmosféricos.

3.3.2 Bioacumulação, transferência trófica e impactos ecológicos

Outro eixo recorrente identificado nos estudos foi a bioacumulação de radionuclídeos e sua transferência ao longo das cadeias alimentares, evidenciando que a contaminação radioativa não permanece restrita aos compartimentos ambientais, mas é incorporada por organismos pertencentes a diferentes níveis tróficos. Esse processo favorece a exposição contínua da fauna e pode representar uma importante via de exposição indireta para os seres humanos por meio do consumo de alimentos contaminados.

As evidências demonstram que a bioacumulação ocorre em uma ampla diversidade de organismos aquáticos e terrestres, incluindo peixes (Alam; Mohamed, 2011; Malek; Nakahara; Nakamura, 2004), crustáceos (Fuller *et al.*, 2017), patos (Leaphart *et al.*, 2022), aves de rapina (Carneiro *et al.*, 2014), cobras (Brown *et al.*, 2022) e gatos de vida livre (Fujishima *et al.*, 2021). Essa diversidade de organismos estudados demonstra que a incorporação de radionuclídeos ocorre em diferentes nichos ecológicos e níveis tróficos, refletindo a ampla distribuição desses contaminantes no ambiente.

Entre os organismos terrestres, os fungos destacam-se como importantes bioacumuladores naturais de radiocésio. Segundo Falandysz *et al.* (2015), espécies do gênero *Boletus* apresentam elevada capacidade de absorver ^{137}Cs diretamente do solo, tornando-se excelentes bioindicadores da contaminação radioativa em ecossistemas florestais. Essa elevada capacidade de acumulação está relacionada à fisiologia dos fungos e à elevada disponibilidade do radionuclídeo na matéria orgânica superficial do solo.

Os insetos detritívoros também desempenham papel fundamental na redistribuição do radiocésio nos ecossistemas florestais. Conforme observado por Ishii, Hayashi e Takamura (2017), esses organismos atuam na decomposição da serapilheira contaminada, promovendo a transferência do radionuclídeo entre diferentes compartimentos ambientais e contribuindo para sua incorporação em níveis tróficos superiores. Esse processo evidencia que a ciclagem biogeoquímica do radiocésio permanece ativa mesmo vários anos após o acidente nuclear de Fukushima.

Nos ecossistemas aquáticos, a transferência trófica também foi amplamente documentada. Estudos conduzidos por Alam e Mohamed (2011) identificaram a presença do radionuclídeo natural ^{210}Po em frutos do mar provenientes de áreas costeiras influenciadas por usinas termelétricas movidas a carvão na Malásia. Embora o polônio-210 possua origem predominantemente natural, atividades industriais podem intensificar sua disponibilidade ambiental, favorecendo sua incorporação por organismos marinhos de interesse comercial e ampliando a exposição humana por meio do consumo de pescado.

Além da simples presença dos radionuclídeos nos organismos, diversos estudos investigaram seus efeitos biológicos. Os resultados apresentados por Brown *et al.* (2022), Carneiro *et al.* (2014) e Fujishima *et al.* (2021) demonstram associações entre maiores

concentrações de radionuclídeos e alterações em parâmetros biológicos, incluindo tamanho corporal, sucesso reprodutivo, carga parasitária e indicadores de condição fisiológica. Embora nem todos os estudos estabeleçam relações causais diretas entre a exposição radiológica e esses efeitos, as evidências sugerem que a exposição crônica pode comprometer a saúde da fauna silvestre e alterar processos ecológicos importantes, especialmente em áreas sujeitas à contaminação persistente.

Outro aspecto recorrente na literatura foi a utilização da fauna silvestre como ferramenta de biomonitoramento ambiental. A avaliação da contaminação em aves, mamíferos, répteis e organismos aquáticos permite compreender não apenas a distribuição espacial dos radionuclídeos, mas também sua disponibilidade biológica e seu potencial de transferência para níveis tróficos superiores. Dessa forma, essas espécies atuam como importantes bioindicadores da qualidade ambiental e da persistência da contaminação radioativa ao longo do tempo.

3.3.3 Co-contaminação, remediação e implicações para a saúde ambiental

Além da contaminação por radionuclídeos, parte dos estudos analisados investigou a ocorrência simultânea de metais potencialmente tóxicos, evidenciando que a exposição ambiental frequentemente ocorre por meio de misturas complexas de contaminantes. Os trabalhos de Brown *et al.* (2022), Carneiro *et al.* (2014), Chernysh *et al.* (2024) e Kuo *et al.* (2014) avaliaram a presença concomitante de radionuclídeos e metais como mercúrio (Hg), chumbo (Pb), cádmio (Cd) e arsênio (As). Essa abordagem integrada é importante, uma vez que esses contaminantes podem apresentar efeitos aditivos ou sinérgicos, potencializando riscos à biodiversidade, aos ecossistemas e à saúde humana. Além disso, a presença simultânea desses elementos dificulta a avaliação dos impactos individuais de cada contaminante e representa um desafio para programas de monitoramento e remediação ambiental.

Entre os eventos históricos de maior relevância relacionados à contaminação radioativa destaca-se o acidente radiológico de Goiânia, ocorrido em 1987, considerado um dos mais graves acidentes envolvendo uma fonte radioativa fora de instalações nucleares. Nesse episódio, a ruptura de uma cápsula contendo cloreto de cézio-137 resultou na

contaminação ambiental e humana por exposição externa e interna à radiação ionizante, ocasionando casos de síndrome aguda da radiação, quatro óbitos confirmados, centenas de pessoas contaminadas, além de expressivos impactos sociais, econômicos e psicológicos para a população afetada (Kazzi *et al.*, 2015). Diferentemente de uma intoxicação alimentar, os efeitos observados decorreram da exposição direta ao material radioativo e da incorporação do radionuclídeo pelo organismo.

No que se refere às estratégias de mitigação, os estudos analisados demonstram que a gestão dos riscos associados aos radionuclídeos envolve ações integradas de monitoramento ambiental, descontaminação, remediação e proteção da saúde pública (Du Bois *et al.*, 2012; De Meutter *et al.*, 2021). A efetividade dessas medidas depende do conhecimento sobre a origem da contaminação, o comportamento ambiental dos radionuclídeos e suas vias de exposição aos organismos vivos.

No contexto da saúde, protocolos específicos para atendimento de indivíduos expostos a materiais radioativos constituem uma etapa essencial da resposta a emergências radiológicas. Os estudos de Koenig *et al.* (2008) e Kazzi *et al.* (2015) destacam procedimentos como triagem radiológica, monitoramento da contaminação externa e interna, descontaminação da pele e de ferimentos, utilização de equipamentos de proteção individual e manejo clínico de pacientes potencialmente expostos. Essas medidas reduzem significativamente o risco de disseminação da contaminação e minimizam a dose absorvida pelos indivíduos afetados.

Entre as estratégias de remediação ambiental, destaca-se a biorremediação, considerada uma alternativa sustentável para áreas contaminadas por radionuclídeos e metais potencialmente tóxicos. Conforme descrito por Chernysh *et al.* (2024), o emprego de biomassa bacteriana, microrganismos e subprodutos industriais, como o fosfogesso, favorece a imobilização desses contaminantes no solo, reduzindo sua mobilidade, biodisponibilidade e transferência para os ecossistemas aquáticos e terrestres.

Outra estratégia identificada na literatura refere-se à redução da exposição humana por meio do processamento dos alimentos. Estudos realizados por Alam e Mohamed (2011) e Malek, Nakahara e Nakamura (2004) demonstraram que procedimentos culinários, como lavagem, cozimento e salga, podem reduzir significativamente a atividade do radiocésio



presente em carnes e pescados destinados ao consumo humano. Embora essas técnicas não eliminem completamente o radionuclídeo, elas constituem medidas complementares importantes para diminuir a ingestão de material radioativo em populações residentes em áreas contaminadas.

Os estudos também evidenciam que a contaminação por radionuclídeos não constitui um processo estático. Eventos ambientais extremos, como incêndios florestais em áreas previamente contaminadas, podem promover a remobilização de radionuclídeos depositados no solo e na vegetação. Conforme observado por De Meutter *et al.* (2021), os incêndios ocorridos na zona de exclusão de Chernobyl favoreceram a ressuspensão atmosférica do ^{137}Cs , possibilitando seu transporte para regiões distantes da área originalmente contaminada. Esses resultados demonstram que áreas consideradas estabilizadas podem voltar a representar fontes secundárias de contaminação décadas após o evento inicial.

De forma geral, as evidências reunidas nesta revisão demonstram que a contaminação por radionuclídeos envolve um processo dinâmico e multifatorial, que se inicia com a liberação dos contaminantes por fontes naturais ou antrópicas, é condicionado pelos mecanismos de transporte e dispersão ambiental, favorece processos de bioacumulação e transferência trófica, gera impactos sobre os ecossistemas e a saúde humana e demanda estratégias contínuas de monitoramento, gestão de riscos e remediação. Esse panorama reforça a necessidade de abordagens interdisciplinares capazes de integrar conhecimentos da radioecologia, ecotoxicologia, oceanografia, saúde pública e gestão ambiental, contribuindo para a prevenção de novos eventos de contaminação e para o desenvolvimento de políticas públicas voltadas à proteção ambiental e da saúde coletiva.

3.3.4 Estratégias de monitoramento e remediação ambiental

A estruturação e o aprimoramento de estratégias de monitoramento e remediação de ambientes contaminados por radionuclídeos constituem um campo de investigação altamente interdisciplinar, que exige a convergência de saberes em engenharia de materiais, radioquímica, biogeoquímica, radioecologia e saúde pública (Beccia *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2023). A transição de diagnósticos de campo estáticos para modelos dinâmicos de exposição



e remediação é governada pela necessidade de entender as vias de transporte físico, especiação química e biocinética dos elementos radioativos na biosfera.

Os estudos incluídos nesta revisão evidenciam que o gerenciamento da contaminação por radionuclídeos depende da integração de diferentes estratégias voltadas ao monitoramento ambiental, à remediação de áreas contaminadas, à proteção da saúde humana e à redução da exposição pela cadeia alimentar. Essas estratégias atuam de forma complementar, permitindo não apenas identificar a presença e a origem dos radionuclídeos no ambiente, mas também reduzir sua mobilidade, limitar a transferência para os organismos vivos e minimizar os riscos ecológicos e sanitários.

No âmbito do monitoramento ambiental, as evidências apontam avanços significativos em métodos capazes de ampliar a precisão espacial e temporal da detecção de radionuclídeos. Varley *et al.* (2017) demonstraram que a espectrometria in situ de alta resolução representa uma alternativa eficiente às amostragens convencionais de solo, possibilitando o mapeamento tridimensional rápido da distribuição de ^{137}Cs e a identificação de áreas críticas de contaminação por meio da combinação de detectores portáteis, análise espectral e modelagem por simulação Monte Carlo. Complementarmente, o *fingerprinting* isotópico mostrou-se uma ferramenta robusta para distinguir diferentes fontes de contaminação. Buesseler *et al.* (2011) utilizaram a razão isotópica $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ para rastrear a dispersão das águas contaminadas pelo acidente de Fukushima, enquanto Galhardi *et al.* (2017) empregaram as razões $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ para caracterizar aportes de urânio provenientes da combustão de carvão em ambientes terrestres.

Outra estratégia amplamente relatada corresponde ao biomonitoramento, que utiliza organismos sentinelas para avaliar a biodisponibilidade e a transferência de radionuclídeos nos ecossistemas. Yang *et al.* (2023) desenvolveram os denominados "Mexilhões Artificiais", sistemas passivos capazes de acumular urânio, estrôncio e cério sem sofrer interferências decorrentes da variabilidade biológica observada em organismos vivos. Em paralelo, Beccia *et al.* (2022) demonstraram a aplicabilidade do ouriço-do-mar como bioindicador da contaminação marinha por urânio, enquanto Yoshihara *et al.* (2012) e Strzałek *et al.* (2021) evidenciaram o potencial de espécies vegetais como registros retrospectivos da deposição de radiocésio em ambientes florestais.

As estratégias de remediação ambiental identificadas concentram-se principalmente na redução da biodisponibilidade dos radionuclídeos e na limitação de sua transferência para a cadeia trófica. Nesse contexto, a fitorremediação representa uma alternativa promissora; entretanto, Galhardi *et al.* (2017) ressaltam que a elevada transferência de urânio e polônio para espécies florestais exige o confinamento e o manejo adequado da biomassa contaminada, evitando sua reincorporação ao ambiente. Em relação às intervenções físicas, Varley *et al.* (2017) demonstraram que a eficiência da remoção superficial do solo depende diretamente da distribuição vertical do ^{137}Cs , sendo mais efetiva em solos orgânicos onde o radionuclídeo permanece concentrado nos primeiros centímetros. Já Hinton *et al.* (2007) e Beresford *et al.* (2020) destacam que a restrição permanente de uso de áreas altamente contaminadas, como observado na Zona de Exclusão de Chernobyl, favoreceu a recuperação ecológica em longo prazo ao eliminar pressões antrópicas adicionais.

No campo da proteção da saúde humana, a literatura enfatiza a importância das estratégias de monitoramento da exposição e descontaminação clínica. Akiyama *et al.* (2015) demonstraram que programas de triagem utilizando equipamentos Whole-Body Counter constituem ferramentas fundamentais para avaliar a contaminação interna da população e reduzir incertezas após acidentes nucleares.

Para situações de exposição aguda, Beccia *et al.* (2022) destacam o desenvolvimento de novos polímeros quelantes capazes de aumentar a eficiência da remoção de actínídeos do organismo, superando limitações observadas nos agentes tradicionalmente empregados.

Zvonova *et al.* (2010) demonstraram que medidas preventivas de manejo agropecuário, como o confinamento do gado e a utilização de rações não contaminadas, reduzem significativamente a transferência de ^{131}I para o leite. Da mesma forma, Nakamura *et al.* (2022) verificaram que programas contínuos de monitoramento de alimentos mantiveram elevados níveis de conformidade após o acidente de Fukushima, enquanto Tsuchiya *et al.* (2017) justificaram restrições ao consumo de espécies vegetais hiperacumuladoras de radiocésio. Complementarmente, Malek *et al.* (2004) demonstraram que técnicas culinárias simples, como a remoção de vísceras e o descarte do caldo de cocção, podem reduzir em até 74,7% a ingestão de ^{137}Cs , evidenciando que medidas domésticas também desempenham papel relevante na mitigação do risco.

De forma integrada, essas evidências demonstram que o gerenciamento da contaminação por radionuclídeos não depende de uma única intervenção, mas da articulação entre diferentes estratégias de monitoramento, remediação e proteção da saúde pública. A combinação dessas abordagens amplia a capacidade de detecção precoce, reduz a mobilidade ambiental dos radionuclídeos e contribui para minimizar seus impactos ecológicos e sanitários, constituindo um conjunto de medidas essenciais para a gestão sustentável de áreas contaminadas.

3.4 Limitações da Revisão

Como limitações desta pesquisa, observa-se a predominância de estudos desenvolvidos em áreas afetadas pelos acidentes de Chernobyl e Fukushima, bem como a escassez de pesquisas realizadas em ecossistemas tropicais e em regiões da América Latina, indicando uma possível lacuna científica. Nesse contexto, recomenda-se que futuras investigações busquem ampliar a aplicação dessas estratégias em diferentes cenários ambientais, incorporem novas tecnologias de monitoramento e aprofundem a avaliação integrada dos efeitos ecotoxicológicos e dos riscos à saúde humana, contribuindo para o aperfeiçoamento das políticas de gestão ambiental e radiológica.

4. CONCLUSÃO

Esta revisão sistemática permitiu compreender que a contaminação por radionuclídeos constitui um problema ambiental complexo, caracterizado pela interação entre diferentes fontes de emissão, mecanismos de dispersão, processos de bioacumulação e impactos ecológicos e sanitários. A análise integrada dos estudos evidenciou que radionuclídeos como ^{137}Cs , ^{131}I , ^{238}U , ^{210}Po e ^{90}Sr apresentam comportamentos distintos no ambiente, influenciados pelas características físico-químicas dos elementos, pelas condições dos ecossistemas e pelas vias de exposição.

A questão de pesquisa foi respondida ao demonstrar que a literatura identifica como principais fontes de contaminação os acidentes nucleares, a mineração, os testes nucleares e

determinadas atividades industriais. Os radionuclídeos dispersam-se por diferentes compartimentos ambientais, acumulam-se em organismos terrestres e aquáticos e produzem impactos ecológicos e sanitários variáveis. Além disso, as evidências permitiram classificar as estratégias disponíveis em monitoramento ambiental, remediação ambiental, proteção da saúde humana e redução da exposição pela cadeia alimentar.

Entre as estratégias de monitoramento destacaram-se a espectrometria in situ, o fingerprinting isotópico e o biomonitoramento por organismos sentinelas, enquanto as medidas de remediação envolveram técnicas de biorremediação, remoção controlada de solos contaminados e restrição de uso de áreas críticas. Paralelamente, programas de vigilância radiológica da população, novos agentes quelantes e o controle rigoroso da cadeia alimentar demonstraram papel relevante na mitigação dos riscos à saúde humana.

Por fim, a revisão também evidenciou que a gestão da contaminação por radionuclídeos depende de uma abordagem integrada, combinando monitoramento contínuo, intervenções ambientais, políticas de saúde pública e estratégias preventivas voltadas à segurança alimentar. Contudo, nenhuma dessas medidas, implementadas isoladamente, mostrou-se suficiente para reduzir os impactos ambientais e sanitários, reforçando a necessidade de ações articuladas entre diferentes áreas do conhecimento e órgãos responsáveis pelo monitoramento ambiental.

Dessa forma, os resultados apresentados ampliam a compreensão sobre o comportamento ambiental dos radionuclídeos e fornecem um panorama atualizado das evidências científicas disponíveis, contribuindo para subsidiar ações de monitoramento, gestão ambiental e proteção da saúde pública.

5 REFERÊNCIAS

AKIYAMA, Junichi; KATO, Shigeaki; TSUBOKURA, Masaharu; MORI, Jinichi; TANIMOTO, Tetsuya; ABE, Koichiro; SAKAI, Shuji; HAYANO, Ryugo; TOKIWA, Michio; SHIMMURA, Hiroaki. Minimal internal radiation exposure in residents living south of the fukushima daiichi nuclear power plant disaster. **PLoS ONE**, [S.l.], v. 10, n. 10, Seção 0, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140482>.

ALAM, Lubna; MOHAMED, Che Abd Rahim. Natural radionuclide of Po210 in the edible seafood affected by coal-fired power plant industry in Kapar coastal area of Malaysia. **Environmental Health**, v. 10, n. 1, p. 43, 2011.

AROMATARIS, E.; LOCKWOOD, C.; PORRIT, K.; PILLA, B.; JORDAN, Z. **JB I Manual for Evidence Synthesis**. [S.l.]: JBI, 2024. Disponível em: <https://synthesismanual.jbi.global/> ou <https://doi.org/10.46658/JBIMES-24-01>. Acesso em: 16 jul. 2026.

BECCIA, Maria Rosa; CREFF, Gaëlle; DEN AUWER, Christophe; DI GIORGIO, Christophe; JEANSON, Aurélie; MICHEL, Hervé. Environmental chemistry of radionuclides: Open questions and perspectives. **ChemPlusChem**, [S.l.], v. 87, n. 8, p. e202200108, 2022.

BERESFORD, Nicholas A; SCOTT, E Marian; COPPLESTONE, David. Field effects studies in the Chernobyl Exclusion Zone: Lessons to be learnt. **Journal of Environmental Radioactivity**, [S.l.], v. 211, p. 105893, 2020.

BROWN, Marty Kyle *et al.* Mercury and radiocesium accumulation and associations with sublethal endpoints in the Florida green watersnake (*Nerodia floridana*). **Environmental toxicology and chemistry**, v. 41, n. 3, p. 758-770, 2022.

BUESSELER, Ken; AOYAMA, Michio; FUKASAWA, Masao. Impacts of the Fukushima Nuclear Power Plants on Marine Radioactivity. **Environmental Science & Technology**, [S.l.], v. 45, n. 23, p. 9931–9935, 1 dez. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1021/es202816c>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es202816c>. Acesso em: 5 jul. 2026.

CARNEIRO, Manuela *et al.* Biomonitoring of heavy metals (Cd, Hg, and Pb) and metalloid (As) with the Portuguese common buzzard (*Buteo buteo*). **Environmental monitoring and assessment**, v. 186, n. 11, p. 7011-7021, 2014.

CHERNYSH, Yelizaveta *et al.* Soil contamination by heavy metals and radionuclides and related bioremediation techniques: A review. **Soil Systems**, v. 8, n. 2, p. 36, 2024.



DE MEUTTER, Pieter *et al.* The assessment of the April 2020 chernobyl wildfires and their impact on Cs-137 levels in Belgium and The Netherlands. **Journal of environmental radioactivity**, v. 237, p. 106688, 2021.

DU BOIS, P. Bailly *et al.* Estimation of marine source-term following Fukushima Dai-ichi accident. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 114, p. 2-9, 2012.

FALANDYSZ, Jerzy *et al.* Evaluation of the radioactive contamination in fungi genus Boletus in the region of Europe and Yunnan Province in China. **Applied microbiology and biotechnology**, v. 99, n. 19, p. 8217-8224, 2015.

FERNANDES, Horst M.; SIMOES FILHO, F. Fernando Lamego; PEREZ, Valeska; FRANKLIN, Mariza Ramalho; GOMIERO, Luiz Alberto. Radioecological characterization of a uranium mining site located in a semi-arid region in Brazil. **Journal of Environmental Radioactivity**, [S.l.], v. 88, n. 2, p. 140–157, 2006.

FUJISHIMA, Yohei *et al.* Transition of radioactive cesium deposition in reproductive organs of free-roaming cats in Namie town, Fukushima. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 4, p. 1772, 2021.

FULLER, Neil *et al.* Does Chernobyl-derived radiation impact the developmental stability of *Asellus aquaticus* 30 years on?. **Science of the Total Environment**, v. 576, p. 242-250, 2017.

GALHARDI, Juliana Aparecida; GARCÍA-TENORIO, Rafael; BONOTTO, Daniel Marcos; FRANCÉS, Inmaculada Díaz; MOTTA, João Gabriel. Natural radionuclides in plants, soils and sediments affected by U-rich coal mining activities in Brazil. **Journal of environmental radioactivity**, [S.l.], v. 177, p. 37–47, 2017.

HINTON, Thomas G; ALEXAKHIN, Rudolph; BALONOV, Mikhail; GENTNER, Norman; HENDRY, Jolyn; PRISTER, Boris; STRAND, Per; WOODHEAD, Dennis. Radiation-induced effects on plants and animals: findings of the United Nations Chernobyl Forum. **Health physics**, [S.l.], v. 93, n. 5, p. 427–440, 2007.



HIROSE, Katsumi *et al.* Plutonium in sea waters of the western North Pacific. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 248, n. 3, p. 771-776, 2001.

ISHII, Yumiko; HAYASHI, Seiji; TAKAMURA, Noriko. Radiocesium transfer in forest insect communities after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. **PLoS One**, v. 12, n. 1, p. e0171133, 2017.

KAZZI, Ziad *et al.* Emergency department management of patients internally contaminated with radioactive material. **Emergency Medicine Clinics**, v. 33, n. 1, p. 179-196, 2015.

KOENIG, Kristi L. *et al.* Health care facility-based decontamination of victims exposed to chemical, biological, and radiological materials. **The American journal of emergency medicine**, v. 26, n. 1, p. 71-80, 2008.

KUO, Li-Jung *et al.* A centennial record of anthropogenic impacts and extreme weather events in southwestern Taiwan: Evidence from sedimentary molecular markers in coastal margin. **Marine pollution bulletin**, v. 86, n. 1-2, p. 244-253, 2014.

LEAPHART, James C. *et al.* Bioaccumulation of Mercury and Radiocesium in Waterfowl Introduced to a Site with Legacy Contamination. **Environmental toxicology and chemistry**, v. 41, n. 10, p. 2479-2487, 2022.

LIND, O. C. *et al.* Characterization of U/Pu particles originating from the nuclear weapon accidents at Palomares, Spain, 1966 and Thule, Greenland, 1968. **Science of the Total Environment**, v. 376, n. 1-3, p. 294-305, 2007.

MAGRE, Anaëlle *et al.* Identification of the origin of radiocesium released into the environment in areas remote from nuclear accident and military test sites using the ¹³⁵Cs/¹³⁷Cs isotopic signature. **Environmental Pollution**, v. 329, p. 121606, 2023.

MALEK, M. A.; NAKAHARA, M.; NAKAMURA, R. Removal of ¹³⁷Cs in Japanese catfish during preparation for consumption. **Journal of radiation research**, v. 45, n. 2, p. 309-317, 2004.

NAKAMURA, Kosuke; CHIBA, Shinji; KIUCHI, Takashi; NABESHI, Hiromi; TSUTSUMI, Tomoaki; AKIYAMA, Hiroshi; HACHISUKA, Akiko. Comprehensive analysis of a decade of cumulative



radiocesium testing data for foodstuffs throughout Japan after the 2011 Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. **PLoS ONE**, [S.l.], v. 17, n. 9, Seção 0, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0274070>.

PETERS, Micah DJ; GODFREY, Christina; MCINERNEY, Patricia; KHALIL, Hanan; LARSEN, Palle; MARNIE, Casey; POLLOCK, Danielle; TRICCO, Andrea C; MUNN, Zachary. Best practice guidance and reporting items for the development of scoping review protocols. **JB I evidence synthesis**, [S.l.], v. 20, n. 4, p. 953–968, 2022.

PRĂVĂLIE, Remus. Nuclear Weapons Tests and Environmental Consequences: A Global Perspective. **Ambio**, [S.l.], v. 43, n. 6, p. 729–744, out. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0491-1>.

STRZAŁEK, Małgorzata; BARCZAK, Katarzyna; KARWOWSKA, Jadwiga; KRÓLAK, Elżbieta. Activity of ¹³⁷Cs and ⁴⁰K Isotopes in Pine (*Pinus sylvestris* L.) and Birch (*Betula pendula* Roth) Stands of Different Ages in a Selected Area of Eastern Poland. **Forests**, [S.l.], v. 12, n. 9, p. 1205, set. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12091205>.

TRICCO, Andrea C; LILLIE, Erin; ZARIN, Wasifa; O'BRIEN, Kelly K; COLQUHOUN, Heather; LEVAC, Danielle; MOHER, David; PETERS, Micah DJ; HORSLEY, Tanya; WEEKS, Laura. PRISMA extension for scoping reviews (PRISMA-ScR): checklist and explanation. **Annals of internal medicine**, [S.l.], v. 169, n. 7, p. 467–473, 2018.

VARLEY, Adam; TYLER, Andrew; DOWDALL, Mark; BONDAR, Yuri; ZABROTSKI, Viachaslau. An in situ method for the high resolution mapping of ¹³⁷Cs and estimation of vertical depth penetration in a highly contaminated environment. **Science of the Total Environment**, [S.l.], v. 605, Seção 0, p. 957–966, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.067>.

YOSHIHARA, Toshihiro; MATSUMURA, Hideyuki; HASHIDA, Shin-Nosuke; NAGAOKA, Toru. Radiocesium contaminations of 20 wood species and the corresponding gamma-ray dose rates around the canopies at 5 months after the Fukushima nuclear power plant accident. **Journal of Environmental Radioactivity**, [S.l.], v. 115, Seção 0, p. 60–68, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.07.002>.



YANG, Yi; CHOW, Tze W.; ZHANG, Yi Q.; YU, Peter K. N.; KO, Chi C.; WU, Rudolf S. S. Artificial Mussels: A New Tool for Monitoring Radionuclides in Aquatic Environments. **JOURNAL OF MARINE SCIENCE AND ENGINEERING**, ST ALBAN-ANLAGE 66, CH-4052 BASEL, SWITZERLAND, v. 11, n. 7, Seção 0, jul. 2023.

ZVONOVA, I.; KRAJEWSKI, P.; BERKOVSKY, V.; AMMANN, M.; DUFFA, C.; FILISTOVIC, V.; HOMMA, T.; KANYAR, B.; NEDVECKAITE, T.; SIMON, S.L.; VLASOV, O.; WEBBE-WOOD, D. Validation of ¹³¹I ecological transfer models and thyroid dose assessments using Chernobyl fallout data from the Plavsk district, Russia. **Journal of Environmental Radioactivity**, [S.l.], v. 101, n. 1, Seção 0, p. 8–15, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2009.08.005>.