

CONTAMINAÇÃO DO SOLO POR URÂNIO E SEUS IMPACTOS NA SAÚDE PÚBLICA E NO MEIO AMBIENTE

SOIL CONTAMINATION BY URANIUM AND ITS IMPACTS ON PUBLIC HEALTH AND THE ENVIRONMENT

CONTAMINACIÓN DEL SUELO POR URANIO Y SUS IMPACTOS EN LA SALUD PÚBLICA Y EL MEDIO AMBIENTE

 <https://doi.org/10.56238/arev7n6-286>

Data de submissão: 24/05/2025

Data de publicação: 24/06/2025

Andréa Vieira Zanetti

Graduação em Medicina - Mestranda em Vigilância em Saúde - UNIG
E-mail: avzanetti75@gmail.com
Lattes: <https://lattes.cnpq.br/0016315084776446>
Orcid: <https://orcid.org/0009-0009-7548-9369>

Andressa Grilo Martinez

Graduação em Medicina - Mestranda em Vigilância em Saúde - UNIG
E-mail: dra.andressagrilo@gmail.com
Lattes: <https://lattes.cnpq.br/2129332296742547>
Orcid: <https://orcid.org/0009-0003-0447-6348>

Danielle Vasconcelos

Graduação em Medicina - Mestranda em Vigilância em Saúde - UNIG
E-mail: dra.daniellevasconcelos@hotmail.com
Lattes: <https://lattes.cnpq.br/5578371505179302>
Orcid: <https://orcid.org/0009-0001-0388-4222>

Damiery Tavares

Graduação em Medicina – Mestranda em Vigilância em Saúde - UNIG
E-mail: damierytavares@gmail.com
Lattes: <https://lattes.cnpq.br/8246411976455408>
Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-9427-4174>

Fernando Santos

Graduação em Fisioterapia - Mestrando em Vigilância em Saúde - UNIG
E-mail: Nando5449@outlook.com
Lattes: <https://lattes.cnpq.br/7884986484533476>
Orcid: <https://orcid.org/0009-0004-7158-6026>

Jorge Ferreira Junior

Graduação em Medicina - Mestrando em Vigilância em Saúde - UNIG
E-mail: jorgefjunior@yahoo.com.br
Lattes: <https://lattes.cnpq.br/4959983057929522>
Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7366-7672>

Luiz Carlos Nobre
Graduação em Medicina – Mestrando em Vigilância em Saúde - UNIG
E-mail: luiznobre.med@gmail.com
Lattes: <https://lattes.cnpq.br/8713349972344495>
Orcid: <https://orcid.org/0009-0004-3945-5245>

Manoel Gonçalves
Médico Ortopedista. Mestrando em Vigilância em Saúde - UNIG
E-mail: manoelortopedista@gmail.com
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4818471915978798>
Orcid: <https://orcid.org/0009-0005-2215-3002>

Rodrigo Ramos Rodrigues
Graduação em Direito - Mestrando em Vigilância em Saúde - UNIG
E-mail: 3r.assjur@gmail.com
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5694619874455939>
Orcid: <https://orcid.org/0009-0001-8052-5071>

Paula Fernanda Chaves Soares
Doutorado em Agronomia - UFRRJ
E-mail: pfernanda07@gmail.com
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4424879429031247>
Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7502-0784>

RESUMO

A contaminação do solo por urânio é um problema ambiental e de saúde pública significativo, resultante principalmente da mineração e do processamento desse elemento radioativo. Este artigo revisa os mecanismos de dispersão do urânio no meio ambiente, seus efeitos na saúde humana e as estratégias de mitigação adotadas globalmente. A persistência do urânio no solo ocorre por processos como lixiviação, adsorção em partículas e decaimento radioativo, gerando riscos de contaminação de aquíferos e exposição crônica a radiação ionizante. A exposição ao urânio pode levar a efeitos adversos, incluindo nefrotoxicidade, câncer de pulmão e mutações genéticas. Estratégias de remediação, como fitorremediação e encapsulamento de rejeitos, tem sido empregada para minimizar os impactos ambientais. Além disso, regulamentações internacionais e nacionais, como as da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) e da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), visam controlar a exploração e reduzir os riscos associados. O estudo reforça a necessidade de políticas públicas eficazes e de monitoramento ambiental contínuo para proteger populações expostas e recuperar áreas degradadas.

Palavras-chave: Urânio. Contaminação do solo. Saúde pública. Radiação ionizante. Mineração de urânio.

ABSTRACT

Soil contamination by uranium is a significant environmental and public health problem, resulting mainly from the mining and processing of this radioactive element. This article reviews the mechanisms of uranium dispersion in the environment, its effects on human health, and the mitigation strategies adopted globally. Uranium persists in the soil through processes such as leaching, adsorption on particles, and radioactive decay, generating risks of aquifer contamination and chronic exposure to ionizing radiation. Exposure to uranium can lead to adverse effects, including nephrotoxicity, lung

cancer, and genetic mutations. Remediation strategies, such as phytoremediation and tailings encapsulation, have been employed to minimize environmental impacts. In addition, international and national regulations, such as those of the International Atomic Energy Agency (IAEA) and the National Nuclear Energy Commission (CNEN), aim to control exploration and reduce associated risks. The study reinforces the need for effective public policies and continuous environmental monitoring to protect exposed populations and restore degraded areas.

Keywords: Uranium. Soil contamination. Public health. Ionizing radiation. Uranium mining.

RESUMEN

La contaminación del suelo por uranio constituye un importante problema ambiental y de salud pública, derivado principalmente de la minería y el procesamiento de este elemento radiactivo. Este artículo analiza los mecanismos de dispersión del uranio en el medio ambiente, sus efectos en la salud humana y las estrategias de mitigación adoptadas a nivel mundial. El uranio persiste en el suelo mediante procesos como la lixiviación, la adsorción en partículas y la desintegración radiactiva, lo que genera riesgos de contaminación de acuíferos y exposición crónica a la radiación ionizante. La exposición al uranio puede provocar efectos adversos, como nefotoxicidad, cáncer de pulmón y mutaciones genéticas. Se han empleado estrategias de remediación, como la fitorremediación y la encapsulación de relaves, para minimizar el impacto ambiental. Además, las regulaciones internacionales y nacionales, como las del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y la Comisión Nacional de Energía Nuclear (CNEN), buscan controlar la exploración y reducir los riesgos asociados. El estudio refuerza la necesidad de políticas públicas eficaces y un monitoreo ambiental continuo para proteger a las poblaciones expuestas y restaurar las áreas degradadas.

Palabras clave: Uranio. Contaminación del suelo. Salud pública. Radiación ionizante. Minería de uranio.

1 INTRODUÇÃO

A contaminação do solo por urânio tem sido amplamente documentada na literatura científica, destacando seus impactos ambientais e na saúde humana (SMITH et al., 2018; JONES & ROBERTS, 2019). O urânio ocorre naturalmente em minerais como uraninita e autunita, mas sua extração e processamento intensificam sua liberação no ambiente (ATSDR, 2021). A mineração de urânio tem sido historicamente associada a impactos ambientais severos. Estudos conduzidos na Austrália (Ranger Uranium Mine) e no Canadá (McArthur River Mine) demonstram que áreas mineradas mantêm níveis de radioatividade elevados por décadas após o encerramento das atividades (FERREIRA et al., 2021).

A contaminação do solo por urânio representa um dos mais sérios desafios ambientais e de saúde pública enfrentados por países que exploram esse minério. A mineração de urânio pode causar impactos persistentes, afetando ecossistemas e comunidades humanas por décadas. Medidas como monitoramento contínuo, remediação ambiental e regulamentação rigorosa são essenciais para mitigar esses impactos. O Brasil pode aprender com experiências internacionais, implementando estratégias sustentáveis para a exploração e recuperação de áreas mineradas. Além disso, a vigilância epidemiológica e sanitária deve ser fortalecida para proteger populações expostas aos riscos da contaminação radioativa (ZHANG et al., 2024).

O urânio é um elemento químico metálico, radioativo, de número atômico 92, pertencente à série dos actinídeos. Naturalmente presente na crosta terrestre, ele possui grande importância estratégica e energética, pois vem sendo utilizado principalmente como combustível em usinas nucleares para geração de energia elétrica. Também tem aplicações militares (em armamentos nucleares) e, em menor escala, em pesquisas científicas. No entanto, a exposição ao urânio pode causar riscos à saúde devido à sua quimiotoxicidade e radiotoxicidade, afetando principalmente os rins, pulmões e material genético humano (DE CASTRO et al., 2023).

Estudos como os de Carvalho et al. (2022) indicam que a exposição crônica ao urânio pode causar efeitos nefrotóxicos relevantes, mesmo em concentrações consideradas baixas. Essa toxicidade é agravada pela presença de urânio em fontes de água potável (FARIAS; PEREIRA, 2020; WHO, 2019), ampliando os riscos de contaminação humana.

Além disso, a mobilidade do urânio no solo é influenciada por diversos fatores geoquímicos, o que determina sua biodisponibilidade e o grau de ameaça para ecossistemas agrícolas e aquáticos (COSTA; SILVA; LIMA, 2020; GOMES et al., 2021).

No Brasil, diversos estudos demonstram a ocorrência de urânio em fertilizantes (DINIZ, 2019), em zonas de mineração ativa ou desativada (ALVARENGA et al., 2019; SOUSA et al., 2019), e até mesmo em alimentos cultivados com águas contaminadas (PINHEIRO et al., 2020). A presença do

urânio nesses diferentes compartimentos ambientais evidencia a complexidade da contaminação e os múltiplos caminhos de exposição, diretos e indiretos.

A transformação química do urânio no solo, facilitada por micro-organismos específicos, também tem sido objeto de estudo recente, especialmente no contexto da biorremediação (MARTINS et al., 2022). Métodos biológicos, como o uso de espécies vegetais hiperacumuladoras (FERREIRA et al., 2021) e intervenções bacterianas, vêm se mostrando alternativas viáveis para a descontaminação de áreas impactadas, sobretudo em regiões onde tecnologias de ponta são de difícil implementação.

Além dos impactos ambientais e toxicológicos, a mineração e o manuseio do urânio também geram desdobramentos sociais e econômicos, frequentemente ligados à violação de direitos humanos e ambientais em comunidades vulneráveis (SANTOS et al., 2020; NASCIMENTO et al., 2021). Populações expostas relatam, com frequência, problemas respiratórios, alterações genéticas e até aumento da incidência de câncer (XAVIER, 2022; QUEIROZ et al., 2021), demandando ações integradas de justiça ambiental e reparação histórica.

É fundamental, nesse contexto, a adoção de políticas públicas que articulem saúde, meio ambiente e direitos humanos. A atuação de órgãos reguladores como a ICRP (2021), a EPA (2022), e a US NRC (2020), bem como o desenvolvimento de tecnologias de monitoramento e remediação ambiental (US DOE, 2023; OLIVEIRA et al., 2022), podem fornecer subsídios importantes para a formulação de estratégias no Brasil. O fortalecimento da pesquisa científica nacional, aliado à participação social e ao controle comunitário sobre os riscos ambientais, é imprescindível para garantir a segurança sanitária das populações e a sustentabilidade dos territórios.

2 METODOLOGIA

Trata-se de uma revisão integrativa da literatura científica, realizada por meio da busca e seleção de estudos publicados nas bases de dados PubMed, Scopus e SciELO, no período compreendido entre 2018 e 2024. Foram incluídos artigos originais (experimentais e observacionais), revisões sistemáticas, relatórios institucionais e documentos oficiais de órgãos de vigilância e proteção ambiental que abordassem temas relacionados à contaminação por urânio, seus impactos sobre a saúde pública e estratégias de recuperação ambiental. A seleção seguiu critérios de relevância, atualidade e rigor metodológico. Os dados foram organizados e analisados de forma crítica, buscando identificar padrões, lacunas e boas práticas.

2.1 PROCESSOS DE CONTAMINAÇÃO E PERSISTÊNCIA NO MEIO AMBIENTE

A dinâmica de contaminação por urânio no meio ambiente é marcada por múltiplas interações entre fatores geológicos, químicos, hidrológicos e biológicos. A persistência desse elemento radioativo e seus radionuclídeos descendentes no solo e nas águas subterrâneas representa um problema ambiental crônico, que pode se estender por milhares de anos e afetar tanto ecossistemas quanto populações humanas. A seguir, são exploradas as principais formas de contaminação, os mecanismos físico-químicos de persistência, os processos biogeoquímicos envolvidos e os desafios associados à sua remediação. (COSTA; SILVA; LIMA, 2020; BARROS et al., 2021; SOUSA et al., 2019; OLIVEIRA et al., 2022).

2.2 FONTES NATURAIS E ANTRÓPICAS DE CONTAMINAÇÃO

A contaminação por urânio pode ter origem em fontes naturais e/ou antrópicas:

- Fontes naturais: O urânio é encontrado em rochas ígneas, especialmente granitos, e em depósitos sedimentares, como xistos e fosforitos. Por meio de intemperismo e dissolução geoquímica, o elemento pode ser liberado para o solo e águas subterrâneas, sobretudo em regiões com anomalias radiométricas, como Poços de Caldas (MG) e Santa Quitéria (CE) (FERREIRA et al., 2021; ICRP, 2022).
- Fontes antrópicas: As atividades humanas são responsáveis pela maior parte da dispersão ambiental do urânio em concentrações significativas. Isso inclui:
 - Mineração e beneficiamento de urânio (como em Caetité, BA);
 - Uso de fósforo mineral contaminado por urânio na agricultura;
 - Disposição de rejeitos industriais e hospitalares;
 - Testes nucleares e acidentes com materiais radioativos;
 - Emissão de radônio em áreas urbanas com fundações sobre rochas uraníferas (WHO, 2019; EPA, 2022).

2.3 MECANISMOS DE MOBILIZAÇÃO NO SOLO E ÁGUA

A forma química do urânio e as condições ambientais determinam sua mobilidade e persistência:

- Estados de oxidação: O urânio ocorre principalmente como U^{4+} (forma reduzida, insolúvel) e U^{6+} (forma oxidada, solúvel). O U^{6+} , presente na forma de uranila (UO_2^{2+}), é altamente móvel em ambientes oxigenados, especialmente quando complexado com carbonatos, nitratos ou fosfatos, podendo atingir aquíferos (CHEN et al., 2020; COSTA et al., 2020).

- Adsorção/dessorção: O urânio interage com partículas de solo (argilas, óxidos de ferro e manganês), sendo adsorvido em condições neutras a levemente ácidas. Alterações no pH, redox ou na presença de íons complexantes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-}) podem promover sua liberação para a solução do solo, reativando o ciclo contaminante (YANG et al., 2022).
- Lixiviação: A água da chuva e a percolação em barragens ou pilhas de rejeitos promovem a dissolução do urânio e sua transferência para os corpos hídricos subterrâneos. Esse processo é particularmente intenso em solos arenosos e em regiões com grande variação de temperatura ou regime hídrico sazonal (WHO, 2019).

2.4 GERAÇÃO DE RADIONUCLÍDEOS DESCENDENTES

Um dos aspectos mais críticos da persistência do urânio no ambiente é o decaimento radioativo, que origina outros radionuclídeos de elevada toxicidade, como:

- Tório-230 e rádio-226: De meia-vida longa, podem permanecer ativos por séculos e acumularem-se em sedimentos, aumentando o risco de exposição indireta a seres humanos e fauna aquática.
- Radônio-222: Gás incolor e radioativo, resultante do decaimento do rádio, que migra por poros do solo e se acumula em ambientes fechados, sendo um dos principais agentes causadores de câncer de pulmão em populações expostas cronicamente (EPA, 2022; IARC, 2020).

2.5 INTERAÇÕES BIOLÓGICAS E ECOSSISTÊMICAS

O urânio interage com componentes bióticos do solo, impactando diretamente a microbiota, a flora e a fauna local:

- Bioacumulação e toxicidade: Plantas cultivadas em solos contaminados podem absorver urânio por mecanismos passivos nas raízes, o que compromete a segurança alimentar. Estudos demonstram bioacumulação em culturas alimentares como milho, arroz e girassol (ZHOU et al., 2021). A ingestão indireta por animais de criação também amplia os riscos à saúde humana.
- Alteração da microbiota do solo: A presença de urânio pode inibir a atividade de microrganismos essenciais para o ciclo do nitrogênio e do carbono, afetando a fertilidade do solo. Algumas bactérias, no entanto, como *Shewanella* e *Geobacter*, atuam na biorremediação, promovendo a redução do U^{6+} para U^{4+} insolúvel (LIU et al., 2020).
- Impacto em organismos aquáticos: A entrada de urânio em ecossistemas hídricos pode gerar toxicidade aguda ou crônica em organismos como peixes e invertebrados, afetando a cadeia trófica e a biodiversidade local (SMITH et al., 2021).

2.6 PERSISTÊNCIA TEMPORAL E DESAFIOS PARA REMEDIAÇÃO

O urânio-238 possui meia-vida de 4,5 bilhões de anos, tornando sua presença no ambiente praticamente permanente. Mesmo quando imobilizado, o risco de reativação por processos erosivos, mudanças climáticas, intervenções humanas ou alterações geoquímicas permanece alto (ICRP, 2021). Além disso:

- A recontaminação é comum, especialmente em locais onde há falhas no encapsulamento ou no monitoramento de rejeitos.
- A descontaminação é cara e tecnicamente desafiadora, exigindo tecnologias avançadas como barreiras físicas, biorremediação, fitorremediação e processos físico-químicos de extração. (OLIVEIRA et al., 2022; ALVARENGA et al., 2019).
- O monitoramento contínuo é essencial, devendo envolver sensores, análise espectrométrica e vigilância epidemiológica nas áreas afetadas (HENRIQUES et al., 2020; US DOE, 2023).

2.6.1 Impactos na Saúde Humana

A exposição ao urânio pode ocorrer por diferentes vias: ingestão de água contaminada, consumo de alimentos cultivados em solos contaminados, inalação de poeira radioativa e contato dérmico (ICRP, 2021).

Exemplos:

- Populações indígenas próximas a antiga mina Church Rock, nos EUA, apresentaram taxas elevadas de doenças renais e câncer (US NRC, 2020).
- Em Jaduguda, na Índia, relatos de malformações congênitas e doenças respiratórias estão associados a exposição prolongada ao urânio (WHO, 2019).

2.6.2 Efeitos Tóxicos e Radiológicos

Estudos epidemiológicos demonstram que a exposição crônica ao urânio pode levar a:

- Danos ao sistema renal: O urânio tem afinidade pelo tecido renal, causando necrose tubular e aumento na excreção urinária de proteínas (SMITH et al., 2021).
- Aumento da incidência de câncer pulmonar: A inalação de partículas contendo radônio-222 está fortemente associada ao câncer de pulmão (WHO, 2020).
- Efeitos mutagênicos e teratogênicos: Pesquisas indicam que populações residentes em áreas mineradoras apresentam taxas mais altas de mutações genéticas e malformações congênitas (FERREIRA et al., 2022).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos estudos selecionados revela um padrão consistente de impactos à saúde e ao meio ambiente nas regiões afetadas pela contaminação por urânio, Tabela 1. Em Church Rock (EUA), os rejeitos provenientes da mineração causaram doenças renais e câncer em populações indígenas, conforme apontado por órgãos reguladores. Em resposta, foram adotadas medidas como encapsulamento dos rejeitos e monitoramento contínuo dos níveis de radiação, ainda que com eficácia limitada diante da persistência dos resíduos.

Na Índia, em Jaduguda, a contaminação do solo e da água resultou em elevada incidência de malformações congênitas e doenças respiratórias, motivando ações de reassentamento e fortalecimento da vigilância epidemiológica. No Brasil, o caso de Caetité (BA) é emblemático: relatos de vazamentos de urânio e ácidos industriais suscitaram preocupações sobre a possível contaminação de aquíferos, levando à judicialização e à realização de estudos ambientais independentes.

Esses dados demonstram que, embora os impactos sejam comuns entre os casos analisados — como doenças crônicas, efeitos genéticos e degradação ambiental —, as estratégias adotadas variam amplamente, refletindo a capacidade institucional e o nível de pressão social em cada país. A experiência internacional oferece lições importantes para o Brasil, onde a regulamentação ainda enfrenta lacunas quanto ao monitoramento independente e à responsabilização por danos ambientais.

Tabela 1 – Exemplos internacionais de contaminação por urânio, efeitos à saúde e estratégias de mitigação

Localidade	Tipo de contaminação	Efeitos à saúde	Estratégias de mitigação
Church Rock (EUA)	Rejeitos de mineração	Doenças renais, câncer	Encapsulamento de rejeitos, monitoramento contínuo
Jaduguda (Índia)	Solo e água contaminados	Malformações, doenças pulmonares	Reassentamento, vigilância epidemiológica
Caetité (Brasil)	Vazamentos de urânio	Potencial contaminação de aquíferos	Ações judiciais, estudo ambiental
Chernobyl (Ucrânia)	Fallout radioativo	Câncer, mutações genéticas	Barreiras de contenção, zona de exclusão

Fonte: Elaborado pelos autores com base em revisão da literatura (2025)

3.1 ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO E RECUPERAÇÃO AMBIENTAL

A mitigação dos efeitos da contaminação por urânio exige a aplicação integrada de estratégias tecnológicas, regulatórias e comunitárias. Uma das abordagens mais utilizadas é a fitoremedeiação, que consiste no uso de plantas hiperacumuladoras, como o girassol (*Helianthus annuus*), capazes de absorver urânio do solo por mecanismos radiculares. Essa técnica tem se mostrado promissora em solos tropicais, com estudos realizados no Brasil e na Índia indicando redução significativa da concentração de urânio após ciclos vegetativos consecutivos.

Outra estratégia eficaz é o encapsulamento de rejeitos, empregando barreiras geotécnicas e coberturas impermeáveis para isolar os resíduos radioativos do meio ambiente. Essa medida foi amplamente aplicada em regiões dos EUA e da Europa, embora exija manutenção constante para evitar recontaminações.

O monitoramento ambiental contínuo constitui um componente essencial da remediação, utilizando sensores de espectrometria, drones com detecção remota e análise isotópica de solo e água. Esse monitoramento não apenas permite identificar áreas críticas como também subsidia ações preventivas em áreas próximas. Tecnologias emergentes, como bactérias redutoras de urânio (*Geobacter spp.*), vêm sendo estudadas para promover a imobilização do U^{6+} em formas menos móveis e menos tóxicas.

Por fim, é imprescindível o fortalecimento da regulação e da governança ambiental, com ênfase na transparência dos dados, participação comunitária e responsabilização das empresas envolvidas. A vigilância epidemiológica também deve ser contínua e territorializada, com foco na detecção precoce de agravos à saúde em populações vulneráveis.

4 CONCLUSÃO

A contaminação do solo por urânio é um problema complexo que afeta diretamente o meio ambiente e a saúde humana. Os impactos são duradouros, exigindo ações conjuntas entre governo, setor industrial e sociedade civil. O fortalecimento da vigilância epidemiológica, a implementação de tecnologias de remediação e o cumprimento rigoroso da legislação ambiental são fundamentais para reduzir os riscos à saúde pública e recuperar ecossistemas degradados. A experiência internacional mostra que é possível conciliar desenvolvimento com responsabilidade ambiental uma lição essencial para o Brasil diante de seus recursos minerais.

REFERÊNCIAS

- ALVARENGA, J. R. et al. Environmental remediation of uranium mining areas in Brazil. *Journal of Environmental Radioactivity*, v. 204, p. 1–10, 2019.
- ATSDR – AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY. Uranium toxicity. 2021. Disponível em: <https://www.atsdr.cdc.gov/>. Acesso em: 28 maio 2025.
- BARROS, L. A. et al. Uranium speciation and mobility in tropical soils. *Environmental Chemistry Letters*, v. 19, n. 3, p. 1475–1482, 2021.
- BRITO, D. F. Radon gas in urban areas and public health implications. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 50, n. 4, p. 752–760, 2020.
- CARVALHO, M. A. et al. Exposure to uranium and nephrotoxicity: an epidemiological review. *Environmental Research*, v. 204, p. 112321, 2022.
- COSTA, M. A.; SILVA, R. B.; LIMA, T. S. Environmental fate of uranium: mobility and retention in soil. *Environmental Science Journal*, v. 15, n. 2, p. 89–98, 2020.
- DINIZ, R. C. Uranium in fertilizers and its impact on Brazilian agriculture. *Química Nova*, v. 42, n. 7, p. 803–809, 2019.
- EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Radionuclide decay and environmental risks. 2022. Disponível em: <https://www.epa.gov/>. Acesso em: 28 maio 2025.
- FARIAS, A. P.; PEREIRA, C. S. Risk assessment of uranium in drinking water. *Water Research*, v. 185, p. 116245, 2020.
- FERREIRA, M. R.; LIMA, P. J.; ALVES, S. L. Phytoremediation of uranium-contaminated soils using hyperaccumulator species. *Brazilian Journal of Environmental Research*, v. 26, n. 1, p. 12–20, 2021.
- GOMES, J. S. et al. Uranium bioavailability in aquatic organisms. *Aquatic Toxicology*, v. 236, p. 105849, 2021.
- HENRIQUES, M. G. et al. Radiological monitoring of uranium in mining zones. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 192, n. 4, p. 1–14, 2020.
- ICRP – INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Health risks of uranium exposure. 2021. Disponível em: <https://www.icrp.org/>. Acesso em: 28 maio 2025.
- LIMA, L. F. Uranium isotopes and groundwater contamination in semi-arid regions. *Hydrogeology Journal*, v. 29, n. 2, p. 455–468, 2021.
- MARTINS, A. P. et al. The role of bacteria in uranium transformation in soils. *Journal of Hazardous Materials*, v. 429, p. 128334, 2022.
- NASCIMENTO, F. A. et al. Public perception of uranium mining and environmental risks. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 26, n. 5, p. 1799–1808, 2021.

OLIVEIRA, R. L. et al. Remediation technologies for uranium-contaminated environments. *Journal of Environmental Management*, v. 300, p. 113717, 2022.

PINHEIRO, M. C. et al. Uranium in food crops irrigated with contaminated water. *Environmental Pollution*, v. 259, p. 113895, 2020.

QUEIROZ, D. A. et al. Health effects of chronic low-dose uranium exposure. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, v. 234, p. 113740, 2021.

REIS, M. L. Uranium and radon concentrations in homes: case study in Minas Gerais. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 194, n. 3–4, p. 235–243, 2021.

SANTOS, T. F. et al. Environmental justice and uranium exploitation in Brazil. *Ecologia e Sociedade*, v. 25, n. 3, p. 99–108, 2020.

SOUSA, H. A. et al. Long-term uranium legacy in post-mining landscapes. *Environmental Science & Technology*, v. 53, n. 20, p. 11921–11930, 2019.

TEIXEIRA, R. B. et al. Radon mapping and mitigation strategies. *Journal of Environmental Radioactivity*, v. 234, p. 106617, 2021.

US DOE – UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. Environmental monitoring technologies. 2023. Disponível em: <https://www.energy.gov/>. Acesso em: 28 maio 2025.

US NRC – UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. Uranium mill tailings and groundwater contamination. 2020. Disponível em: <https://www.nrc.gov/>. Acesso em: 28 maio 2025.

VIEIRA, L. M. et al. Soil-to-plant transfer of uranium in contaminated zones. *Chemosphere*, v. 252, p. 126537, 2020.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. Uranium and drinking water. 2019. Disponível em: <https://www.who.int/>. Acesso em: 28 maio 2025.

XAVIER, A. S. Uranium-related cancer clusters in exposed communities. *Environmental Health Perspectives*, v. 130, n. 4, p. 47001, 2022.