

Contaminação Ambiental por Metais Pesados: Uma Revisão Sistemática de Revisões sobre Impactos Ecotoxicológicos, Riscos à Saúde Humana e Estratégias de Mitigação

Environmental Contamination by Heavy Metals: A Systematic Review of Reviews on Ecotoxicological Impacts, Human Health Risks, and Mitigation Strategies

Contaminación Ambiental por Metales Pesados: Una Revisión Sistemática de Revisiones sobre Impactos Ecotoxicológicos, Riesgos para la Salud Humana y Estrategias de Mitigación

Rafael Rocha Leitão

Afiliação: Faculdade de Engenharia Florestal, Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém – Pará, Brasil
E-mail institucional: rafael.leitao@discente.ufra.edu.br

Vítor Rocha Leitão

Afiliação: Faculdade de Medicina, Universidade Federal do Pará, Belém – Pará, Brasil
E-mail institucional: vitor.leitao@ics.ufpa.br

RESUMO (PORTUGUÊS):

A contaminação ambiental por metais pesados representa um desafio crescente à saúde pública, à segurança alimentar e à integridade dos ecossistemas. Elementos como chumbo, cádmio, arsênio e cobre apresentam alta toxicidade, bioacumulação e persistência no ambiente, com impactos diretos sobre organismos aquáticos, terrestres e seres humanos. Este estudo realizou uma *umbrella review* (revisão sistemática de revisões sistemáticas) a partir da análise crítica de onze revisões publicadas entre 2018 e 2025. A seleção seguiu critérios de elegibilidade baseados em rigor metodológico, escopo temático e relevância ambiental e sanitária. A extração e organização dos dados priorizaram informações sobre os tipos de metais analisados, matrizes de exposição, efeitos ecotoxicológicos e humanos, estratégias de mitigação e lacunas identificadas. Os resultados revelaram bioacumulação expressiva de metais em peixes, moluscos e vegetais cultivados, ultrapassando limites de segurança internacionalmente reconhecidos. Evidências apontam para efeitos tóxicos sistêmicos, incluindo disfunções hepáticas, hormonais e reprodutivas, além de risco aumentado de câncer. Produtos de uso cotidiano, como pastas dentais, também foram identificados como fontes relevantes de exposição. Estratégias de remediação como biorremediação e bioissorção mostram-se promissoras, embora ainda careçam de validação operacional em larga escala. Conclui-se que a abordagem de “Saúde Única” é essencial para enfrentar o problema de forma integrada e que políticas públicas mais robustas, protocolos padronizados de biomonitoramento e inovação tecnológica são necessários para mitigar os impactos da poluição por metais pesados.

Palavras-chave: Metais Pesados; Contaminação Ambiental; Saúde Pública; Bioacumulação; Biorremediação; Revisão Sistemática; Ecotoxicologia.

ABSTRACT (ENGLISH):

Environmental contamination by heavy metals poses an increasing threat to public health, food safety, and ecosystem integrity. Elements such as lead, cadmium, arsenic, and copper are highly toxic, persistent, and bioaccumulative, with direct impacts on aquatic and terrestrial organisms as well as humans. This study conducted an *umbrella review* (systematic review of systematic reviews) based on a critical analysis of eleven reviews published between 2018 and 2025. Study selection followed strict eligibility criteria based on methodological rigor, thematic relevance, and environmental-health focus. Data extraction and synthesis prioritized information on the types of metals investigated, exposure matrices, ecotoxicological and human health effects, mitigation strategies,

and identified research gaps. The findings revealed significant bioaccumulation of metals in fish, mollusks, and cultivated plants, often exceeding internationally accepted safety thresholds. Evidence also highlighted systemic toxic effects, including hepatic, hormonal, and reproductive dysfunctions, as well as increased cancer risk. Common consumer products, such as toothpaste, were identified as additional exposure sources. Remediation strategies such as bioremediation and biosorption showed promise but require further validation for large-scale application. This review concludes that a One Health approach is essential to address the issue integratively, and calls for stronger public policies, standardized biomonitoring protocols, and technological innovation to mitigate the impacts of heavy metal pollution.

Keywords: Heavy Metals; Environmental Pollution; Public Health; Bioaccumulation; Bioremediation; Systematic Review; Ecotoxicology.

RESUMEN (ESPAÑOL):

La contaminación ambiental por metales pesados constituye una amenaza creciente para la salud pública, la seguridad alimentaria y la integridad de los ecosistemas. Elementos como plomo, cadmio, arsénico y cobre presentan alta toxicidad, persistencia y capacidad de bioacumulación, afectando directamente a organismos acuáticos, terrestres y humanos. Este estudio realizó una *umbrella review* (revisión sistemática de revisiones sistemáticas), basada en el análisis crítico de once revisiones publicadas entre 2018 y 2025. La selección siguió criterios de elegibilidad fundamentados en el rigor metodológico, la relevancia temática y el impacto sanitario y ambiental. La extracción de datos priorizó información sobre los metales analizados, las matrices de exposición, los efectos ecotoxicológicos y en la salud humana, las estrategias de mitigación propuestas y las lagunas de conocimiento identificadas. Los resultados evidenciaron bioacumulación significativa de metales en peces, moluscos y vegetales comestibles, superando los límites internacionales de seguridad. Se documentaron efectos tóxicos sistémicos, como disfunciones hepáticas, hormonales y reproductivas, además de un aumento del riesgo de cáncer. También se identificaron productos de uso cotidiano, como pastas dentales, como fuentes relevantes de exposición. Las estrategias de remediación basadas en biorremediación y biosorción se presentan como soluciones prometedoras, aunque aún requieren validación operativa a gran escala. Se concluye que el enfoque de “Una Sola Salud” es imprescindible para abordar el problema de manera integral, y que son necesarias políticas públicas más robustas, protocolos estandarizados de biomonitoreo e innovación tecnológica para mitigar los impactos de la contaminación por metales pesados.

Palabras clave: Metales Pesados; Contaminación Ambiental; Salud Pública; Bioacumulación; Biorremediación; Revisión Sistemática; Ecotoxicología.

1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com a contaminação ambiental por metais pesados tem sido sustentada por evidências robustas, demonstrando que elementos como chumbo (Pb), arsênio (As) e cádmio (Cd) estão amplamente disseminados em ambientes urbanos, industriais e agrícolas, sendo associados a efeitos adversos à saúde humana, tais como neoplasias, doenças cardiovasculares, distúrbios neurológicos e reprodutivos (DUFFUS, 2002; WHO, 2013). A toxicidade desses metais decorre de sua natureza não biodegradável, alta reatividade e potencial de bioacumulação e biomagnificação ao longo das cadeias tróficas. Frente a isso, tem aumentado o número de revisões sistemáticas e meta-análises que analisam os impactos dessas exposições, reforçando a magnitude do problema. Uma *umbrella review* recente, por exemplo, demonstrou associação significativa entre a exposição a metais não essenciais — particularmente chumbo, cádmio e arsênio — e desfechos como mortalidade por todas as

causas e doenças cardiovasculares, apontando implicações diretas para a saúde pública global (MARQUES *et al.*, 2024).

No entanto, apesar do avanço da literatura, permanece evidente uma lacuna crítica: enquanto múltiplas revisões sistemáticas abordam aspectos isolados da contaminação por metais pesados — como sua presença em alimentos, água, solo, ou produtos de consumo — ainda é escassa a produção científica que integre, de maneira abrangente e crítica, os diferentes eixos de exposição, efeitos toxicológicos e estratégias de remediação em uma única análise de nível terciário. Essa ausência de integração prejudica a construção de políticas públicas eficazes, baseadas em uma visão sistêmica do problema. Uma revisão sistemática recente sobre metais em vegetais no sul da Ásia, por exemplo, evidenciou sérias limitações metodológicas em avaliações de risco humano, alertando para a necessidade urgente de abordagens mais holísticas e coordenadas (NOWAR *et al.*, 2024).

Nesse contexto, a presente pesquisa tem como objetivo realizar uma revisão sistemática de revisões sistemáticas (umbrella review) acerca da contaminação por metais pesados, sintetizando criticamente os achados sobre seus efeitos ecotoxicológicos, impactos na saúde humana, estratégias de mitigação propostas e lacunas existentes na literatura. Ao integrar os diferentes domínios de exposição e desfecho, esta revisão busca oferecer subsídios técnico-científicos para o aprimoramento das políticas ambientais e sanitárias, bem como orientar futuras investigações com foco em abordagens interdisciplinares e baseadas em evidência.

2. METODOLOGIA

O presente estudo foi conduzido segundo o delineamento de uma umbrella review, ou seja, uma revisão sistemática de revisões sistemáticas, com o objetivo de sintetizar criticamente o estado da arte da literatura científica acerca da contaminação ambiental por metais pesados, seus efeitos ecotoxicológicos e sobre a saúde humana, as estratégias de mitigação propostas e as principais lacunas de pesquisa identificadas. Essa abordagem é indicada para consolidar achados de estudos secundários de alta hierarquia metodológica, permitindo uma visão panorâmica e integrativa dos temas abordados.

A seleção dos estudos analisados partiu de um corpus previamente disponibilizado, composto por onze revisões sistemáticas publicadas entre os anos de 2018 e 2025, todas com resumo completo e estrutura metodológica declarada. Foram considerados elegíveis os estudos

que preencheram os seguintes critérios: apresentação formal como revisão sistemática ou meta-análise, foco na exposição ambiental a metais pesados, descrição de efeitos adversos ecológicos ou sanitários, discussão de métodos de mitigação e presença de informações metodológicas suficientes para análise comparativa. Foram excluídos estudos primários, revisões narrativas, artigos opinativos e documentos sem validação científica em bases indexadas.

A extração de dados dos resumos foi realizada manualmente por dois avaliadores de forma independente, com posterior verificação cruzada para garantir a consistência das informações. As variáveis extraídas incluíram: identificação do estudo (autor, ano, DOI), escopo geográfico, metais investigados, matrizes ambientais ou biológicas analisadas, espécies bioindicadoras, população-alvo (humana ou não humana), parâmetros avaliados (bioacumulação, efeitos toxicológicos, biomarcadores), estratégias de remediação, diretrizes regulatórias mencionadas e lacunas declaradas pelos autores. Essas informações foram sistematizadas em uma matriz analítica estruturada, permitindo a organização temática e a triangulação das evidências.

A análise seguiu abordagem qualitativa e interpretativa, com ênfase nos eixos analíticos definidos a priori: (i) comparação do escopo e da metodologia dos estudos incluídos, (ii) síntese dos achados centrais, (iii) identificação dos riscos à saúde humana e ecossistêmica, (iv) avaliação das estratégias de mitigação e remediação descritas. A interpretação dos dados foi orientada pelo paradigma da "Saúde Única", reconhecendo a interdependência entre saúde ambiental, saúde humana e biodiversidade. A heterogeneidade das abordagens metodológicas entre os estudos foi considerada como variável de análise, sendo destacadas as divergências quanto à seleção de biomarcadores, espécies indicadoras, protocolos analíticos e critérios de risco.

Embora a análise tenha se baseado apenas nos resumos dos artigos, o conjunto de informações extraídas permitiu estabelecer um panorama confiável e crítico sobre o tema. A natureza terciária da revisão isenta a pesquisa de apreciação por Comitê de Ética, pois não envolveu coleta de dados primários nem avaliação de sujeitos humanos ou animais. No entanto, reconhece-se como limitação o fato de não ter sido possível acessar os textos completos dos artigos incluídos, o que pode restringir a profundidade de algumas interpretações. Ainda assim, a consistência metodológica das revisões selecionadas, todas indexadas em periódicos de alto impacto e com diretrizes reconhecidas, sustenta a validade e a utilidade científica dos resultados apresentados.

3. DISCUSSÕES

A presente análise integrativa dos resumos de revisões sistemáticas sobre contaminação ambiental por metais pesados revela um cenário alarmante e multifacetado, com impactos significativos sobre a saúde humana, a biodiversidade e os ecossistemas aquáticos e terrestres, conforme o Quadro 01 abaixo.

Quadro 01. Síntese de evidências selecionadas.

Título do Estudo	Foco Principal	Escopo Geográfico	População/Matriz Analisada	Metais Investigados
Estudo sobre a Fauna Tailandesa	Avaliar o desenho de estudos e metodologias sobre a bioacumulação de metais pesados na fauna tailandesa e seus impactos ecológicos e na saúde.	Tailândia, com destaque para hidrovias em Bangkok, Lago Songkhla e locais de mineração na Província de Loei.	Fauna tailandesa, incluindo peixes (42,11% dos estudos), moluscos (31,58%), anfíbios e crustáceos.	Cádmio (Cd), chumbo (Pb), cobre (Cu) e zinco (Zn).
Estudo sobre o Delta do Níger (Nigéria)	Investigar níveis, distribuição, riscos e fontes de metais pesados em regiões selecionadas do Delta do Níger, sob a perspectiva de "Saúde Única".	Cidades selecionadas no Delta do Níger, Nigéria, com destaque para o estado de Rivers.	Ecossistemas (solos, água, sedimentos), frutos do mar e plantas. Organismos de fundo, como bivalves e gastrópodes, apresentaram maiores concentrações.	Cd, Pb, Cu, Cr, Mn, Fe e Ni.
Estudo sobre Arsênico e Qualidade do Sêmen	Investigar o efeito da exposição ao arsênico nos níveis de metabólitos urinários de arsênico, parâmetros do sêmen e testosterona.	Global, por meio de uma meta-análise de estudos de bases de dados.	Homens, com 347 expostos e 380 no grupo de controle.	Arsênico (As).
Estudo sobre Pastas de Dente	Compilar informações sobre a presença de metais pesados em pastas de dente.	Global, com estudos "de todo o mundo".	Pastas de dente de venda livre.	Metais pesados de forma geral.
Estudo sobre Hepatotoxicidade e Extratos de Plantas	Mapear o impacto de extratos de plantas e metabólitos secundários no metabolismo redox do fígado em modelos pré-clínicos de exposição ao	Global, por meio de uma revisão de 41 estudos pré-clínicos in vivo.	Modelos pré-clínicos de exposição ao Pb (animais). O fígado é o órgão-alvo central.	Chumbo (Pb).

Título do Estudo	Foco Principal	Escopo Geográfico	População/Matriz Analisada	Metais Investigados
	chumbo.			
Estudo sobre Arsênico e Chumbo em Camarões	Estimar o risco de câncer bucal induzido por As e Pb pelo consumo de camarão.	Golfo Pérsico.	Camarões (511 amostras) e seus consumidores, divididos por faixa etária.	Arsênico (As) e Chumbo (Pb).
Estudo sobre Biorremediação e Bioissorção	Revisar métodos ecológicos emergentes para eliminar metais pesados da água, com ênfase em biorremediação e bioissorção.	Global, através de uma revisão de técnicas e avanços na área.	Água contaminada e materiais bioSORVENTES (ex: resíduos agrícolas, biochar, micróbios).	Metais pesados tóxicos em geral.
Estudo sobre Minas Abandonadas e Vida Selvagem	Avaliar os impactos negativos e positivos de Terras de Minas Abandonadas (AMLs) na vida selvagem.	Estados Unidos, onde existem centenas de milhares de AMLs.	Vida selvagem (invertebrados e vertebrados), com descobertas de benefícios para populações de morcegos ameaçadas.	Metais pesados provenientes de drenagem de minas.
Estudo sobre Estresse por Metais Pesados em Arroz	Analisar sistematicamente as respostas morfológicas e fisiológicas de cultivares de arroz ao estresse por metais pesados.	Global, por meio de uma revisão sistemática e meta-análise.	Cultivares de arroz.	Metais pesados em geral.
Estudo sobre Óleo de Câncer Usado	Descrever as implicações toxicológicas associadas à exposição a Óleo de Câncer Usado (SCO).	Global, por meio de uma revisão sistemática e meta-análise.	Humanos (estudos de exposição ocupacional) e animais de laboratório.	Bioacumulação de metais pesados foi um dos achados listados.
Estudo sobre Mariscos como Bioindicadores	Explorar o uso de mariscos como bioindicadores, as metodologias empregadas e as interações entre contaminantes e a resposta do hospedeiro.	Global, com estudos abrangendo 14 países.	Mariscos (26 espécies avaliadas).	Parte de 24 contaminantes avaliados, com foco principal nos biomarcadores.

Fonte: autores, 2025.

A partir da síntese das evidências, observa-se que a bioacumulação de metais pesados é um fenômeno recorrente em diversas matrizes ambientais e biológicas, sendo considerada uma das principais ameaças à integridade dos sistemas ecológicos (PHAENARK *et al.*, 2024; ONYENA *et al.*, 2024).

Os estudos apontam a presença de concentrações elevadas de cádmio (Cd), chumbo (Pb), cobre (Cu), arsênio (As), zinco (Zn), níquel (Ni), manganês (Mn) e ferro (Fe) em diferentes contextos geográficos e ecológicos, superando em muitos casos os limites estabelecidos por organismos internacionais de saúde e meio ambiente (WHO, FAO/WHO). Na Tailândia, por exemplo, a contaminação por metais pesados em ambientes aquáticos urbanos e industriais tem resultado em alta bioacumulação em peixes das famílias Cyprinidae e Cichlidae, bem como em moluscos filtradores, como *Tegillarca granosa*, e crustáceos, como *Fenneropenaeus merguensis*, o que os torna importantes bioindicadores ambientais (PHAENARK *et al.*, 2024). Essa situação repete-se no Delta do Níger, onde organismos bentônicos exibem maiores concentrações metálicas, em razão da alta carga de poluentes provenientes de atividades industriais, agrícolas e de petróleo (ONYENA *et al.*, 2024).

Os efeitos adversos da bioacumulação extrapolam o nível ecológico e atingem diretamente a saúde humana. A meta-análise conduzida por Akhigbe *et al.* (2024) demonstrou que a exposição ao arsênio compromete de forma significativa parâmetros da qualidade seminal, como volume, motilidade e concentração espermática, além de reduzir os níveis séricos de testosterona. Os achados sugerem que o arsênio atua como um disruptor endócrino, interferindo na espermatogênese e na função hormonal, o que constitui um importante alerta para populações expostas cronicamente a esse elemento, seja por via ocupacional ou ambiental.

Outro aspecto relevante refere-se à presença de metais pesados em produtos de uso cotidiano, como pastas de dente. A revisão sistemática conduzida por Chengappa *et al.* (2025) confirmou a detecção de concentrações preocupantes de metais em formulações de pastas dentais comercializadas mundialmente, o que representa não apenas um risco para o consumidor, mas também uma fonte adicional de contaminação ambiental por meio do descarte diário no sistema de esgoto. Tal evidência aponta para uma lacuna regulatória e a urgência na definição de limites seguros para metais essenciais e não essenciais em produtos de higiene pessoal.

Do ponto de vista toxicológico, o fígado é reiteradamente identificado como órgão-alvo dos efeitos adversos dos metais pesados. A revisão sistemática de Destro *et al.* (2023) evidenciou que a exposição ao chumbo promove a geração de espécies reativas de oxigênio e nitrogênio (ROS e RNS), inibe enzimas antioxidantes endógenas e compromete o metabolismo redox hepático. Os estudos pré-clínicos incluídos demonstraram que extratos vegetais ricos em flavonoides, taninos, antocianinas e vitaminas atuam como agentes hepatoprotetores, atuando tanto na quelação do chumbo quanto na modulação de vias antioxidantes, abrindo perspectivas para o desenvolvimento de estratégias terapêuticas complementares em populações expostas.

A ingestão de frutos do mar contaminados, por sua vez, constitui uma via relevante de exposição humana. A revisão conduzida por Fakhri *et al.* (2018) sobre camarões do Golfo Pérsico estimou um risco aumentado de câncer oral decorrente do consumo de amostras com teores de chumbo e arsênio superiores aos limites toleráveis, com valores de risco incremental de câncer (ILCR) superiores a 10^{-3} em faixas etárias mais jovens, o que ultrapassa os níveis considerados aceitáveis pelas agências internacionais de saúde. Tais dados reforçam a necessidade de políticas públicas de controle alimentar e de comunicação efetiva dos riscos à população.

As estratégias de mitigação propostas nos estudos analisados evidenciam um consenso em torno da necessidade de ações integradas. Abordagens baseadas em biotecnologia, como a biorremediação e a bioissorção, têm ganhado destaque como soluções sustentáveis e economicamente viáveis para remoção de metais pesados de ambientes aquáticos contaminados (YAASHIKAA *et al.*, 2024). Os avanços incluem o uso de microrganismos geneticamente modificados, resíduos agrícolas como bioissorventes, técnicas de imobilização e aprimoramentos com nanotecnologia, ampliando a eficácia dos métodos e reduzindo os custos operacionais.

O estudo de Grajal-Puche *et al.* (2024) sobre minas abandonadas nos Estados Unidos traz uma perspectiva menos explorada, ao mostrar que, embora essas áreas sejam geralmente prejudiciais à fauna silvestre devido ao escoamento contaminado, também podem oferecer refúgio para espécies ameaçadas, como morcegos. Isso evidencia a importância de avaliações ecossistêmicas mais abrangentes e da padronização de métodos de monitoramento da fauna para embasar decisões de remediação.

Nesse sentido, o uso de moluscos e mariscos como bioindicadores também se mostra promissor. Conforme evidenciado por Fehrenbach *et al.* (2025), esses organismos apresentam elevada sensibilidade a variações ambientais e contaminação por metais, sendo capazes de refletir rapidamente as condições da água. No entanto, a ausência de consenso quanto aos biomarcadores utilizados, à escolha das espécies e aos protocolos de análise limita a comparabilidade entre estudos e a aplicação prática em políticas de vigilância ambiental, o que evidencia uma importante lacuna científica a ser superada.

Por fim, os dados discutidos apontam para a necessidade urgente de padronização metodológica em estudos de biomonitoramento, elaboração de diretrizes regulatórias robustas para produtos de uso comum e intensificação da cooperação internacional em políticas de controle ambiental e sanitário. A abordagem integrativa “Saúde Única” emerge como o paradigma necessário para enfrentar os desafios complexos da contaminação ambiental por metais pesados, articulando saúde humana, animal e ambiental em um modelo de governança científica, regulatória e intersetorial.

4. CONCLUSÃO

A síntese crítica das onze revisões sistemáticas examinadas neste estudo corrobora que a contaminação ambiental por metais pesados constitui um problema de elevada complexidade, multidimensionalidade e implicações transversais sobre a saúde humana, a integridade ecológica e a segurança alimentar. A análise revelou a presença persistente de metais como cádmio, chumbo, cobre, arsênio, zinco, níquel e manganês em níveis superiores aos limites de segurança preconizados por organismos reguladores, com bioacumulação significativa em organismos aquáticos, flora cultivada e, indiretamente, na população humana por meio da cadeia alimentar e de produtos de uso cotidiano.

Os efeitos adversos documentados extrapolam os danos ecotoxicológicos e incluem disfunções hormonais, hepáticas e reprodutivas, com destaque para a redução dos parâmetros seminais e da testosterona em homens expostos ao arsênio, elevação de marcadores de dano hepático e renal em modelos animais expostos ao chumbo e risco estimado de câncer oral associado à ingestão de camarões contaminados por metais no Golfo Pérsico. Tais achados não apenas reforçam a toxicidade sistêmica desses elementos, mas também evidenciam a

insuficiência de mecanismos de vigilância e controle efetivo, sobretudo em países em desenvolvimento.

A discussão apontou ainda lacunas metodológicas significativas, especialmente relacionadas à heterogeneidade dos modelos experimentais, à ausência de padronização nos biomarcadores e na escolha de espécies bioindicadoras, bem como à escassez de dados sobre determinados grupos ecológicos, como detritívoros bentônicos e espécies de vida silvestre em áreas degradadas. A falta de consensos técnicos limita a comparabilidade entre estudos e enfraquece a capacidade de orientar políticas públicas baseadas em evidência.

Em contrapartida, destaca-se o avanço nas tecnologias de biorremediação e biossorção como alternativas promissoras e sustentáveis para a remediação ambiental. A aplicação de microrganismos, resíduos agrícolas, biochar e técnicas associadas à nanotecnologia mostra-se eficiente na remoção de metais pesados de ambientes aquáticos, embora ainda demande estudos adicionais para validação em larga escala. Do ponto de vista preventivo, os efeitos protetores de extratos vegetais sobre o fígado exposto ao chumbo representam um campo emergente de pesquisa translacional com potencial terapêutico.

Conclui-se que a abordagem de “Saúde Única” é imprescindível para compreender e mitigar os impactos da poluição por metais pesados, exigindo articulação entre setores de saúde, meio ambiente, agricultura, indústria e ciência regulatória. Recomenda-se, com base nos dados analisados, o fortalecimento das ações normativas para limites máximos de metais em produtos de consumo, o desenvolvimento de protocolos padronizados de biomonitoramento ambiental, a ampliação da pesquisa em lacunas taxonômicas e geográficas, bem como a implementação de programas integrados de remediação e vigilância contínua. A complexidade do problema requer soluções interdisciplinares, sustentáveis e baseadas em evidências científicas robustas, com a finalidade de preservar a saúde humana, proteger a biodiversidade e promover a resiliência dos ecossistemas frente à crescente pressão antrópica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKHIGBE, R. E. *et al.* Toxic impacts of arsenic bioaccumulation on urinary arsenic metabolites and semen quality: A systematic and meta-analysis. *Ecotoxicol Environ Saf.*, v. 281, p. 116645, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116645>.

CHENGAPPA, K. *et al.* Heavy metal content of over-the-counter toothpastes—a systematic review of in vitro studies. *Front Dent Med.*, v. 6, p. 1543972, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/fdmed.2025.1543972>.

DESTRO, A. L. F. *et al.* Impact of plant extracts on hepatic redox metabolism upon lead exposure: a systematic review of preclinical in vivo evidence. *Environ Sci Pollut Res Int.*, v. 30, n. 40, p. 91563–91590, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28620-8>.

DUFFUS, J. H. A. “Heavy metals” a misused term. *Acta Geochimica*, [S. l.], v. 41, p. 95–99, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11672-021-01428-3>.

FAKHRI, Y. *et al.* Systematic review and health risk assessment of arsenic and lead in the fished shrimps from the Persian gulf. *Food Chem Toxicol.*, v. 113, p. 278–286, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fct.2018.01.046>.

FEHRENBACH, G. W. *et al.* Monitoring water contamination through shellfish: A systematic review of biomarkers, species selection, and host response. *Ecotoxicol Environ Saf.*, v. 295, p. 118120, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118120>.

GRAJAL-PUCHE, A.; DRIVER, E. M.; PROPPER, C. R. Review: Abandoned mines as a resource or liability for wildlife. *Sci Total Environ.*, v. 921, p. 171017, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171017>.

MARQUES, A. P. *et al.* Association of environmental metallic and metalloid contaminants with cardiovascular disease: An umbrella review. *European Journal of Preventive Cardiology*, [S. l.], 2024. DOI: <https://doi.org/10.1093/eurjpc/zwaf118>.

NOWAR, A. *et al.* A systematic review on heavy metals contamination in Bangladeshi vegetables and their associated health risks. *Frontiers in Environmental Science*, [S. l.], v. 12, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1425286>.

ONYENA, A. P. *et al.* Engaging One Health in Heavy Metal Pollution in Some Selected Nigerian Niger Delta Cities: A Systematic Review of Pervasiveness, Bioaccumulation and Subduing Environmental Health Challenges. *Biol Trace Elem Res.*, v. 202, n. 4, p. 1356–1389, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12011-023-03762-5>.

PHAENARK, C.; PHANKAMOLSIL, Y.; SAWANGPROH, W. Ecological and health implications of heavy metal bioaccumulation in Thai Fauna: A systematic review. *Ecotoxicol Environ Saf.*, v. 285, p. 117086, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117086>.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. Lead poisoning and health. Geneva: World Health Organization, 2013. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/factsheets/detail/lead-poisoning-and-health>. Acesso em: 3 jul. 2025.

YAASHIKAA, P. R.; PALANIVELU, J.; HEMAVATHY, R. V. Sustainable approaches for removing toxic heavy metal from contaminated water: A comprehensive review of bioremediation and biosorption techniques. *Chemosphere*, v. 357, p. 141933, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141933>.