

# **BIOACUMULAÇÃO DE METAIS POTENCIALMENTE TÓXICOS EM HORTALIÇAS E RISCO À SAÚDE HUMANA**

**BIOACCUMULATION OF POTENTIALLY TOXIC METALS IN VEGETABLES  
AND RISKS TO HUMAN HEALTH**

Ciências Agrárias, Ciências da Saúde • 30/10/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/793326417](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/793326417)

---

Jozadake Petry Fausto<sup>1</sup>

Paulo de Tércio da Silva Júnior<sup>2</sup>

João Vitor Trindade<sup>3</sup>

Sandro Wilton Paulino de Farias<sup>4</sup>

Maura Gabriela da Silva Brochado<sup>5</sup>

Maria Thalia Paulino de Farias<sup>6</sup>

Priscila Santos Lisboa Silva<sup>7</sup>

Josilene Pereira Silva<sup>8</sup>

Mariana Cabral do Nascimento Santos<sup>9</sup>

---

## RESUMO

A contaminação de sistemas agrícolas por metais potencialmente tóxicos constitui uma preocupação ambiental e sanitária devido à persistência desses elementos e à possibilidade de transferência ao longo do contínuo solo-água-planta-alimento-consumidor. Este estudo teve como objetivo analisar as evidências científicas recentes sobre a bioacumulação de metais potencialmente tóxicos em hortaliças destinadas ao consumo humano e os potenciais riscos associados à exposição alimentar. Foi realizada uma revisão sistemática da literatura, de caráter qualitativo e descritivo, orientada pelas recomendações do PRISMA 2020, com buscas nas bases SciELO, Scopus, Web of Science, ScienceDirect, PubMed e Portal de Periódicos CAPES, abrangendo publicações entre 2021 e 2026. As evidências analisadas demonstraram que Cd, Pb, Cr, Ni, As, Hg, Cu e Zn podem alcançar os sistemas hortícolas por diferentes fontes, destacando-se fertilizantes e resíduos orgânicos, águas residuárias utilizadas na irrigação, atividades industriais e minerárias, deposição atmosférica e descarte inadequado de resíduos. A transferência desses elementos para os tecidos vegetais mostrou-se dependente não apenas de suas concentrações no ambiente, mas também da biodisponibilidade, das características físico-químicas do solo, dos mecanismos de absorção e translocação e das diferenças entre espécies, cultivares e órgãos comestíveis. Hortaliças folhosas, raízes, tubérculos e hortaliças-fruto apresentaram padrões distintos de acumulação, evidenciando que não é possível estabelecer uma relação uniforme entre o teor do contaminante no ambiente e sua concentração no alimento. A exposição alimentar crônica constitui uma importante via de contato humano com esses elementos, sendo sua relevância sanitária condicionada pela concentração no alimento, frequência e quantidade consumida e toxicidade do elemento. Indicadores como EDI, HQ/THQ, HI e CR são

fundamentais para distinguir a ocorrência de contaminantes da efetiva caracterização dos riscos não carcinogênicos e carcinogênicos. Conclui-se que a avaliação da segurança das hortaliças requer uma abordagem integrada entre qualidade ambiental, bioacumulação vegetal e exposição alimentar, associada ao monitoramento contínuo dos sistemas produtivos e à aplicação criteriosa dos limites regulatórios.

**Palavras-chave:** Metais potencialmente tóxicos; Hortaliças; Bioacumulação; Exposição alimentar; Segurança dos alimentos.

## **ABSTRACT**

The contamination of agricultural systems by potentially toxic metals represents an environmental and public health concern due to the persistence of these elements and their potential transfer along the soil–water–plant–food–consumer continuum. This study aimed to analyze recent scientific evidence on the bioaccumulation of potentially toxic metals in vegetables intended for human consumption and the potential risks associated with dietary exposure. A qualitative and descriptive systematic literature review was conducted following the PRISMA 2020 guidelines, with searches performed in SciELO, Scopus, Web of Science, ScienceDirect, PubMed, and the CAPES Journals Portal, covering publications from 2021 to 2026. The analyzed evidence demonstrated that Cd, Pb, Cr, Ni, As, Hg, Cu, and Zn can enter vegetable production systems through various sources, particularly fertilizers and organic amendments, wastewater used for irrigation, industrial and mining activities, atmospheric deposition, and improper waste disposal. The transfer of these elements into plant tissues was found to depend not only on their environmental concentrations but also on their bioavailability, soil physicochemical properties, uptake and translocation mechanisms, and differences among species, cultivars,

and edible plant organs. Leafy vegetables, roots, tubers, and fruiting vegetables exhibited distinct accumulation patterns, indicating that no uniform relationship can be established between contaminant levels in the environment and their concentrations in food. Chronic dietary exposure constitutes an important pathway of human contact with these elements, with its public health significance determined by contaminant concentrations in food, consumption frequency and quantity, and element-specific toxicity. Indicators such as estimated daily intake (EDI), hazard quotient (HQ/THQ), hazard index (HI), and carcinogenic risk (CR) are essential for distinguishing the presence of contaminants from the actual characterization of non-carcinogenic and carcinogenic risks. It is concluded that assessing vegetable safety requires an integrated approach encompassing environmental quality, plant bioaccumulation, and dietary exposure, combined with continuous monitoring of production systems and the careful application of regulatory limits.

**Keywords:** Potentially toxic metals; Vegetables; Bioaccumulation; Dietary exposure; Food safety.

## 1. INTRODUÇÃO

A contaminação dos sistemas agrícolas por metais e metalóides potencialmente tóxicos constitui uma questão relevante para a qualidade ambiental e a segurança dos alimentos, principalmente devido à persistência desses elementos e à possibilidade de transferência entre solo, água, plantas e organismos consumidores (Nieder *et al.*, 2024; Ali; Ahirwar, 2025). Elementos como cádmio (Cd), chumbo (Pb), arsênio (As), mercúrio (Hg), cromo (Cr) e níquel (Ni) não são degradados no ambiente e podem ser redistribuídos por processos físico-químicos e biológicos (Nieder *et al.*, 2024; Tang *et al.*,

2023). Em áreas agrícolas, fertilizantes, resíduos orgânicos, águas residuárias, deposição atmosférica e atividades industriais ou minerárias podem favorecer sua introdução e enriquecimento nos sistemas produtivos (Ziegler Rivera *et al.*, 2023; Wan *et al.*, 2024), possibilitando sua transferência para culturas destinadas à alimentação humana (Romero-Crespo *et al.*, 2023; Ali; Ahirwar, 2025).

Entre os alimentos envolvidos nessa transferência, as hortaliças apresentam especial interesse devido à diversidade de espécies e órgãos consumidos e à elevada frequência de consumo, inclusive na forma crua ou minimamente processada (Seyfferth *et al.*, 2024; Jalil *et al.*, 2026). A absorção desses elementos pelas plantas depende não apenas de sua concentração no solo, mas também da especiação química, biodisponibilidade, pH, matéria orgânica, características da rizosfera e da própria espécie vegetal (Liu *et al.*, 2023; Lin *et al.*, 2024). Após a absorção, mecanismos de retenção radicular, complexação, compartimentalização e transporte vascular influenciam sua distribuição entre raízes, caules, folhas, tubérculos e frutos (Zhao *et al.*, 2022; Lin *et al.*, 2024). Assim, a bioacumulação resulta da interação entre propriedades do contaminante, condições ambientais e características fisiológicas e genéticas das plantas (Seyfferth *et al.*, 2024; Jalil *et al.*, 2026).

Estudos recentes têm identificado Pb, Cd, Cr, Ni, As e outros elementos em hortaliças folhosas, raízes, tubérculos e hortaliças-fruto, com expressiva variação entre espécies e locais de produção (Chowdhury *et al.*, 2024; Jalil *et al.*, 2026). Uma metanálise envolvendo hortaliças irrigadas com águas residuárias demonstrou diferenças na acumulação de Pb, Cd, Cu, As, Zn, Ni e Cr entre os vegetais avaliados, evidenciando a influência do tipo de cultura e das condições de exposição (Jalali; Meyari, 2022; Jalil *et al.*, 2026). Essa

heterogeneidade reforça que a interpretação da contaminação deve considerar a espécie, o órgão comestível, o elemento analisado e o sistema de produção, evitando generalizações quanto à capacidade de acumulação de determinados grupos vegetais (Chowdhury *et al.*, 2024; Ali; Ahirwar, 2025).

A relevância sanitária dessa contaminação decorre da possibilidade de exposição humana por meio do consumo de tecidos vegetais contaminados, especialmente quando a ingestão ocorre continuamente (Zhao *et al.*, 2024). A exposição crônica a determinados elementos pode estar associada a efeitos adversos, cuja magnitude depende da dose, duração da exposição, toxicidade do contaminante e características da população exposta (Mustatea; Ungureanu, 2024). Entretanto, a detecção de um elemento em uma hortaliça não demonstra isoladamente risco à saúde, pois a exposição alimentar depende também da quantidade e frequência de consumo e da massa corporal do indivíduo (Chowdhury *et al.*, 2024; Ali; Ahirwar, 2025).

Nesse sentido, a avaliação de risco complementa a determinação das concentrações nos alimentos. Indicadores como ingestão diária estimada (Estimated Daily Intake — EDI), quociente de risco ou quociente de risco-alvo (Hazard Quotient/Target Hazard Quotient — HQ/THQ), índice de risco (Hazard Index — HI) e risco carcinogênico (Carcinogenic Risk — CR) permitem relacionar as concentrações encontradas aos parâmetros de exposição e toxicidade (Chowdhury *et al.*, 2024; Jalil *et al.*, 2026). Os resultados desses indicadores variam conforme o elemento, alimento e população analisados, havendo cenários sem indicação de preocupação e outros com potenciais riscos não carcinogênicos ou carcinogênicos (Chowdhury *et al.*, 2024). Dessa forma, a caracterização do risco deve considerar

conjuntamente as concentrações nos tecidos comestíveis, os padrões de consumo e os pressupostos dos modelos de exposição (Jalali; Meyari, 2022; Ali; Ahirwar, 2025).

Apesar do avanço das pesquisas, as evidências permanecem dispersas entre diferentes espécies vegetais, elementos químicos, sistemas de cultivo, fontes de contaminação e métodos de avaliação de risco, dificultando uma interpretação integrada da relação entre contaminação ambiental, bioacumulação vegetal e exposição humana (Ali; Ahirwar, 2025; Jalil *et al.*, 2026). Diferenças na expressão das concentrações em massa fresca ou seca, no preparo das amostras, nos métodos analíticos e nos parâmetros utilizados nos cálculos de risco também limitam a comparação entre estudos (Chowdhury *et al.*, 2024; Jalil *et al.*, 2026). A sistematização crítica da literatura pode, portanto, contribuir para identificar padrões de acumulação, elementos de maior relevância e lacunas ainda existentes (Jalali; Meyari, 2022; Jalil *et al.*, 2026).

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo analisar, por meio de revisão da literatura, as evidências recentes sobre a bioacumulação de metais potencialmente tóxicos em hortaliças destinadas ao consumo humano e os potenciais riscos associados à exposição alimentar. Para isso, integram-se informações sobre as fontes de contaminação dos sistemas agrícolas, os processos de absorção e acumulação nos tecidos vegetais, a ocorrência desses elementos em hortaliças e os indicadores empregados na avaliação de riscos não carcinogênicos e carcinogênicos. Busca-se, assim, compreender de forma integrada a trajetória solo/água-planta-alimento-consumidor e identificar lacunas relevantes para o monitoramento ambiental, a segurança dos alimentos e a proteção da saúde humana.

## **2. METODOLOGIA**

### **2.1. Tipo de Estudo**

Foi realizada uma revisão sistemática da literatura, de caráter qualitativo e descritivo, com o objetivo de reunir, analisar e sintetizar evidências científicas sobre a ocorrência e a bioacumulação de metais potencialmente tóxicos em hortaliças destinadas ao consumo humano e os possíveis riscos à saúde associados à exposição alimentar. A revisão contemplou estudos relacionados às fontes de contaminação dos sistemas agrícolas, absorção, translocação e acúmulo dos elementos nos tecidos vegetais, ocorrência em diferentes grupos de hortaliças, concentrações nas partes comestíveis e avaliação da exposição e do risco à saúde humana.

A condução da revisão foi orientada pelas recomendações do *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA 2020), conforme Page *et al.* (2021), buscando assegurar maior transparência e reprodutibilidade nas etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos.

### **2.2. Estratégia de Busca**

A busca bibliográfica foi realizada nas bases de dados SciELO, Scopus, Web of Science, ScienceDirect, PubMed e Portal de Periódicos CAPES, considerando publicações entre 2021 e 2026. A seleção dessas bases teve como finalidade ampliar a cobertura da literatura científica relacionada à contaminação de hortaliças por metais potencialmente tóxicos, bioacumulação vegetal e avaliação dos riscos decorrentes do consumo desses alimentos.

Foram utilizados descritores em português e inglês relacionados aos principais eixos da revisão, combinados por meio dos operadores booleanos AND e OR. Entre os termos empregados estiveram: “metais potencialmente tóxicos”, “metais pesados”, “elementos potencialmente tóxicos”, “hortaliças”, “vegetais”, “bioacumulação”, “absorção”, “translocação”, “contaminação de alimentos”, “exposição alimentar”, “risco à saúde humana”, *“potentially toxic elements”*, *“toxic metals”*, *“heavy metals”*, *“vegetables”*, *“edible vegetables”*, *“bioaccumulation”*, *“uptake”*, *“translocation”*, *“food contamination”*, *“dietary exposure”* e *“human health risk”*.

Os descritores foram organizados em combinações de busca, como: (“potentially toxic elements” OR “heavy metals” OR “toxic metals”) AND (“vegetables” OR “edible vegetables”) AND (“bioaccumulation” OR “uptake” OR “translocation”); e (“heavy metals” OR “potentially toxic elements”) AND “vegetables” AND (“dietary exposure” OR “human health risk”). As estratégias foram adaptadas às particularidades e aos mecanismos de indexação de cada base de dados, mantendo-se os mesmos eixos conceituais da pesquisa.

### **2.3. Critérios de Elegibilidade**

Foram incluídos artigos científicos publicados entre 2021 e 2026, disponíveis integralmente, nos idiomas português, inglês ou espanhol, que apresentassem resultados relacionados à ocorrência, concentração, absorção, translocação ou bioacumulação de metais e metaloides potencialmente tóxicos em hortaliças destinadas ao consumo humano. Foram considerados estudos envolvendo hortaliças folhosas, raízes, tubérculos, bulbos, hortaliças-fruto e outros órgãos vegetais comestíveis.

Também foram considerados elegíveis estudos que investigassem a relação entre a contaminação do solo ou da água de irrigação e a transferência dos elementos para os tecidos vegetais, bem como trabalhos que apresentassem dados sobre Cd, Pb, Cr, Ni, As, Hg, Cu, Zn ou outros elementos de relevância toxicológica. Para a avaliação dos riscos à saúde humana, foram incluídos estudos que apresentassem informações sobre exposição alimentar ou indicadores de avaliação de risco, como ingestão diária estimada (*Estimated Daily Intake* — EDI), quociente de risco (*Hazard Quotient* — HQ), quociente de risco-alvo (*Target Hazard Quotient* — THQ), índice de risco (*Hazard Index* — HI) e risco carcinogênico (*Carcinogenic Risk* — CR), ou indicadores equivalentes.

Foram excluídos artigos duplicados, estudos publicados fora do período estabelecido, trabalhos sem acesso ao texto completo e estudos que não apresentassem relação direta com hortaliças destinadas à alimentação humana. Também foram excluídos trabalhos restritos exclusivamente a culturas não alimentares, plantas utilizadas apenas para fitorremediação, espécies medicinais sem finalidade alimentar ou matrizes que não permitissem estabelecer relação com a contaminação de hortaliças. Resumos de eventos, editoriais, cartas ao editor, capítulos de livros, trabalhos de conclusão de curso, dissertações, teses e outros documentos que não correspondessem a artigos científicos completos também foram excluídos.

## **2.4. Seleção dos Estudos**

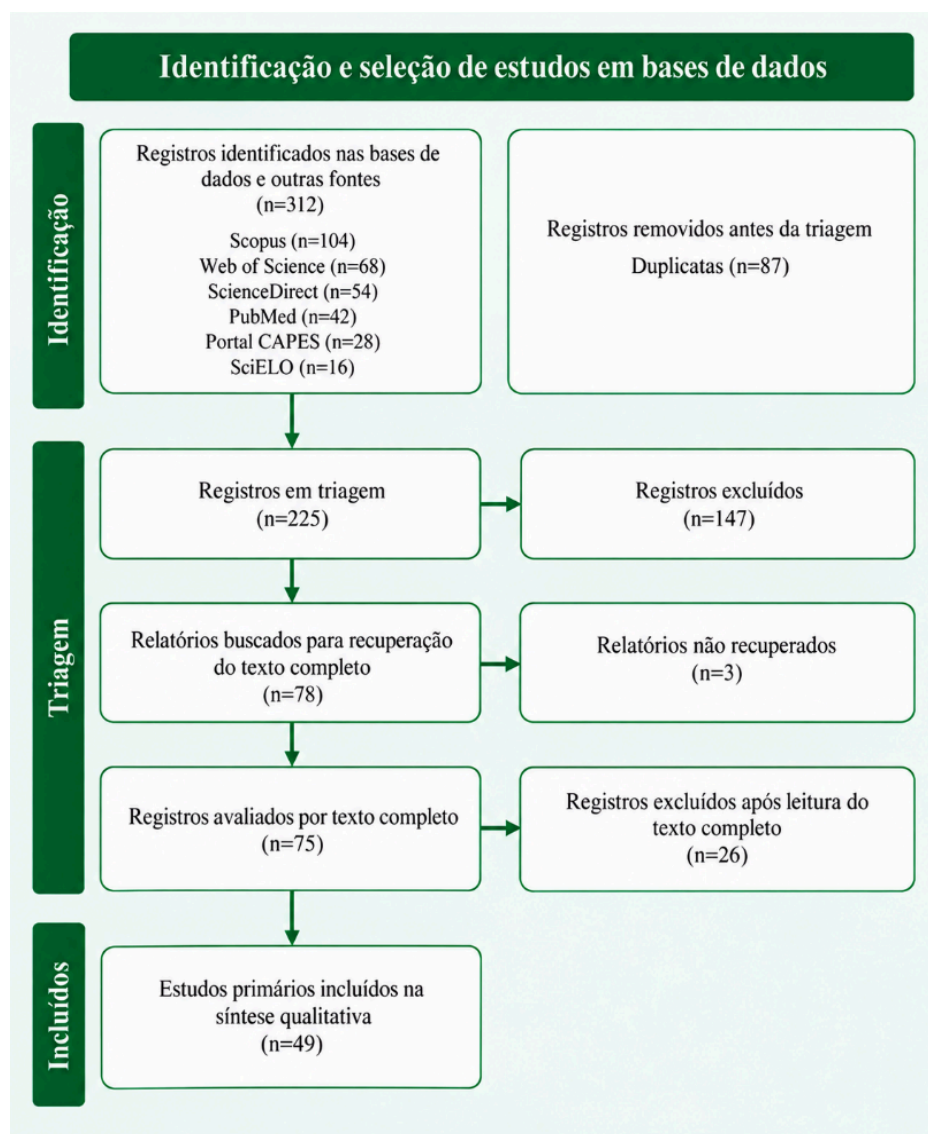
A seleção dos estudos foi realizada em etapas sucessivas, de acordo com o fluxo recomendado pelo PRISMA 2020. Inicialmente, foram identificados os registros recuperados nas bases de dados

selecionadas. Em seguida, procedeu-se à identificação e remoção dos registros duplicados.

Após essa etapa, os estudos remanescentes foram submetidos à triagem por meio da leitura dos títulos e resumos, sendo excluídos aqueles que não apresentavam relação com os objetivos da revisão. Os trabalhos considerados potencialmente elegíveis foram posteriormente submetidos à leitura do texto completo, com aplicação dos critérios de inclusão e exclusão previamente estabelecidos.

As buscas realizadas nas bases SciELO, Scopus, Web of Science, ScienceDirect, PubMed e Portal de Periódicos CAPES resultaram na identificação de 312 registros. Após a remoção de 87 duplicatas, 225 registros permaneceram para a etapa de triagem por títulos e resumos. Nessa fase, 147 registros foram excluídos por não apresentarem aderência ao escopo da revisão. Assim, 78 relatórios foram buscados para recuperação do texto completo, dos quais três não puderam ser obtidos. Permaneceram, portanto, 75 artigos para avaliação de elegibilidade mediante leitura integral. Após essa etapa, 26 estudos foram excluídos por não atenderem aos critérios de inclusão, resultando em 49 estudos incluídos na síntese qualitativa. O processo de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos encontra-se representado no fluxograma elaborado conforme as recomendações do PRISMA 2020 (Figura 1).

**Figura 1.** Fluxograma do processo de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos na revisão sistemática.



**Fonte:** Elaborado pelos autores (2026).

## 2.5. Extração e Análise dos Dados

Para cada artigo incluído na revisão foram extraídas, quando disponíveis, informações referentes à autoria, ano de publicação, país ou região de realização do estudo, espécie de hortaliça investigada, grupo ou órgão vegetal comestível, metais ou metaloides avaliados, características do sistema de cultivo, possíveis fontes de contaminação, matriz ambiental analisada, método analítico empregado e concentrações dos elementos determinadas nos tecidos vegetais.

Também foram extraídas informações relacionadas à dinâmica de transferência dos contaminantes no sistema solo/água-planta,

incluindo, quando apresentadas pelos estudos, concentrações no solo ou na água de irrigação, concentrações nas raízes e partes aéreas, fatores de bioconcentração ou bioacumulação, fatores de transferência e translocação e diferenças de acumulação entre espécies, cultivares e órgãos vegetais.

Para os estudos que avaliaram a exposição e os riscos à saúde humana, foram registrados os parâmetros utilizados na estimativa de exposição alimentar e os respectivos indicadores de risco, incluindo EDI, HQ/THQ, HI e CR, bem como população avaliada, taxa de ingestão, massa corporal e valores toxicológicos de referência, quando informados. Nos estudos que compararam as concentrações encontradas com padrões regulatórios, foram registrados o limite utilizado, a instituição ou legislação de referência, a categoria do alimento, a unidade de concentração e a expressão dos resultados em massa fresca ou massa seca.

Os dados extraídos foram organizados em quadro de síntese para permitir a comparação entre os estudos. A análise foi realizada de forma qualitativa e descritiva, considerando as semelhanças, diferenças e tendências observadas entre espécies vegetais, elementos químicos, órgãos comestíveis, condições ambientais e cenários de exposição.

## **2.6. Apresentação dos Resultados**

Os resultados foram organizados de acordo com os principais eixos temáticos identificados na literatura, contemplando a ocorrência e a distribuição dos metais potencialmente tóxicos em hortaliças, as principais fontes de contaminação dos sistemas produtivos, os mecanismos envolvidos na absorção, translocação e bioacumulação,

as diferenças de acúmulo entre grupos de hortaliças e órgãos comestíveis e as implicações para a exposição alimentar humana.

Também foram consideradas as concentrações dos elementos nos tecidos comestíveis e, quando metodologicamente comparáveis, sua relação com os limites máximos estabelecidos por organismos reguladores. Na interpretação dessas comparações foram consideradas a categoria do alimento, a unidade empregada e a expressão das concentrações em massa fresca ou massa seca, evitando comparações diretas entre resultados apresentados em bases distintas.

Os estudos que realizaram avaliação de risco à saúde foram analisados quanto aos indicadores EDI, HQ/THQ, HI e CR, permitindo discutir separadamente a magnitude da exposição alimentar, o potencial de efeitos não carcinogênicos e o risco carcinogênico teórico associado à ingestão das hortaliças avaliadas. A síntese final buscou identificar padrões de contaminação e bioacumulação, elementos e grupos de hortaliças mais frequentemente investigados, fatores associados à transferência dos contaminantes para os tecidos comestíveis e lacunas existentes na literatura, contribuindo para a identificação de necessidades futuras de pesquisa, monitoramento e segurança dos alimentos.

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

#### **3.1. Metais Potencialmente Tóxicos no Ambiente Agrícola**

A presença de elementos potencialmente tóxicos (EPTs) em ambientes agrícolas constitui uma preocupação devido à persistência desses contaminantes no solo, à possibilidade de transferência para as culturas e à consequente inserção na cadeia

alimentar. A expressão EPTs abrange elementos químicos que, dependendo da concentração, especiação e biodisponibilidade, podem exercer efeitos adversos sobre organismos e ecossistemas, incluindo metais e metaloides de relevância ambiental (Nieder *et al.*, 2024; Tang *et al.*, 2023). Diferentemente de muitos contaminantes orgânicos, esses elementos não são degradados por processos químicos ou biológicos convencionais e podem permanecer no solo por longos períodos, sendo redistribuídos entre diferentes compartimentos ambientais (Nieder *et al.*, 2024; Ziegler Rivera *et al.*, 2023). Dessa forma, seu acúmulo em áreas agrícolas pode comprometer a qualidade das culturas e constituir uma via indireta de exposição humana (Jahandari; Abbasnejad, 2023; Cai *et al.*, 2024).

Nos agroecossistemas, os EPTs podem ter origem geogênica ou antrópica. O intemperismo de rochas e minerais libera naturalmente elementos-traço, fazendo com que características geológicas e pedogenéticas influenciem seus teores de fundo (Nieder *et al.*, 2024; Souza *et al.*, 2024). Entretanto, atividades agrícolas, industriais, minerárias e urbanas podem intensificar seu aporte por meio de fertilizantes, resíduos, deposição atmosférica e água de irrigação (Nieder *et al.*, 2024; Ziegler Rivera *et al.*, 2023). Entre os insumos agrícolas, fertilizantes fosfatados merecem atenção por constituírem fontes potenciais de As, Cd e Cr, cuja aplicação sucessiva pode favorecer sua incorporação ao solo e posterior transferência para os tecidos vegetais (Carvalho *et al.*, 2024; Cai *et al.*, 2024).

A presença desses elementos no solo, contudo, não implica necessariamente elevada disponibilidade para as plantas. Após sua introdução no sistema, os EPTs podem ser adsorvidos às argilas, associados à matéria orgânica, retidos por óxidos de Fe e Mn, precipitados ou permanecer na solução do solo (Ziegler Rivera *et al.*,

2023; Nieder *et al.*, 2024). Assim, a concentração total não é suficiente para estimar seu potencial de transferência, pois mobilidade e biodisponibilidade dependem da especiação química e das propriedades físico-químicas do solo (Jahandari; Abbasnejad, 2023; Ziegler Rivera *et al.*, 2023). Alterações no pH e na salinidade podem modificar significativamente esse comportamento, favorecendo, em determinadas condições, a solubilização e mobilização de elementos como Cu, Zn, Cd e Cr (Ziegler Rivera *et al.*, 2023; Nieder *et al.*, 2024).

Entre os EPTs de maior interesse agrícola e alimentar destacam-se Cd, Pb, Cr, Ni, As, Hg, Cu e Zn, embora apresentem diferenças quanto à função biológica e à toxicidade. Cu, Zn e Ni desempenham funções essenciais ou benéficas no metabolismo vegetal em concentrações adequadas, mas seu excesso pode alterar a homeostase celular, comprometer processos metabólicos e reduzir o crescimento e a produtividade das plantas (Tang *et al.*, 2023; Rashid *et al.*, 2023). Em contraste, Cd, Pb, Hg e As não apresentam função fisiológica essencial reconhecida nas plantas e estão associados a efeitos tóxicos mesmo em baixas concentrações, enquanto a avaliação do Cr requer atenção à sua forma química, uma vez que seus estados de oxidação apresentam comportamentos e toxicidades distintos (Tang *et al.*, 2023; Nieder *et al.*, 2024).

O Cd apresenta particular relevância em sistemas agrícolas por sua toxicidade e capacidade de transferência do solo para partes comestíveis. Fertilizantes fosfatados constituem uma de suas fontes, e concentrações mais elevadas desse elemento nos fertilizantes podem favorecer sua presença na seiva do xilema e nos tecidos vegetais (Carvalho *et al.*, 2024; Nieder *et al.*, 2024). Sua absorção também pode ocorrer por transportadores envolvidos na aquisição

de micronutrientes essenciais, evidenciando a relação entre nutrição mineral e contaminação vegetal (Liu *et al.*, 2024; Tang *et al.*, 2023). Pb, As e Hg também apresentam elevada relevância toxicológica, embora sua mobilidade seja condicionada pela especiação e pelas interações com os constituintes do solo, como matéria orgânica e óxidos de Fe (Ziegler Rivera *et al.*, 2023; Jahandari; Abbasnejad, 2023).

Cr e Ni também requerem monitoramento, considerando que suas concentrações nos solos podem decorrer tanto do substrato geológico quanto de atividades antrópicas (Jahandari; Abbasnejad, 2023; Cai *et al.*, 2024). Para o Cr, análises baseadas exclusivamente na concentração total apresentam limitações toxicológicas devido às diferenças entre suas formas químicas (Tang *et al.*, 2023; Nieder *et al.*, 2024). Já Cu e Zn exemplificam a relação entre essencialidade e toxicidade: embora sejam micronutrientes indispensáveis, concentrações excessivas podem comprometer a fisiologia vegetal, tornando necessária a manutenção de níveis adequados no sistema solo-planta (Tang *et al.*, 2023; Rashid *et al.*, 2023).

Portanto, a relevância dos EPTs nos agroecossistemas resulta da interação entre concentração, persistência, especiação, mobilidade e biodisponibilidade. Elementos acumulados no solo podem permanecer relativamente imobilizados ou tornar-se disponíveis em resposta às alterações ambientais, possibilitando sua absorção pelas raízes e transferência para tecidos vegetais (Ziegler Rivera *et al.*, 2023; Nieder *et al.*, 2024). Essa dinâmica é especialmente importante na produção de hortaliças, pois a transferência dos EPTs para partes comestíveis estabelece a conexão entre contaminação do agroecossistema, bioacumulação vegetal e potencial exposição humana pela dieta (Reis *et al.*, 2025; Rashid *et al.*, 2023).

### 3.2. Fontes de Contaminação de Solos e Águas Utilizados na Produção de Hortaliças

A contaminação dos sistemas de produção de hortaliças por metais potencialmente tóxicos (MPTs) resulta da interação entre fontes naturais e, principalmente, aportes antropogênicos relacionados às práticas agrícolas, urbanização e atividades produtivas desenvolvidas no entorno das áreas cultivadas (Wan *et al.*, 2024; Romero-Crespo *et al.*, 2023). Entre as principais vias de entrada destacam-se fertilizantes minerais, resíduos orgânicos, águas residuárias utilizadas na irrigação, deposição atmosférica e emissões industriais e de mineração (Wan *et al.*, 2024; Ziegler Rivera *et al.*, 2023). A contribuição dessas fontes depende das características regionais, do histórico de uso da terra, da composição dos insumos e da intensidade das práticas agrícolas, sendo particularmente relevante em sistemas hortícolas intensivos, nos quais aplicações sucessivas de insumos e ciclos frequentes de irrigação podem promover aportes contínuos de elementos-traço ao sistema solo-água-planta (Romero-Crespo *et al.*, 2023; Hu *et al.*, 2024). As principais fontes, vias de entrada e implicações da contaminação por MPTs em sistemas hortícolas estão sintetizadas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Principais fontes de metais potencialmente tóxicos em sistemas de produção de hortaliças

| Fonte de contaminação                 | Principais MPTs associados  | Via de entrada no sistema hortícola | Principais implicações  | Referências                                          |
|---------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------------|
| Fertilizantes minerais, especialmente | Cd e outros elementos-traço | Aplicação ao solo                   | Acúmulo gradual no solo | Suciu <i>et al.</i> (2022); Hu <i>et al.</i> (2024); |

|                                           |                                   |                                |                                  |                                                                  |
|-------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| <b>nte fosfatados</b>                     |                                   |                                |                                  | Wan <i>et al.</i> (2024)                                         |
| <b>Estercos e compostos orgânicos</b>     | Variável conforme a matéria-prima | Adubação orgânica              | Introdução de elementos-traço    | Chen <i>et al.</i> (2024); Wan <i>et al.</i> (2024)              |
| <b>Águas residuárias e efluentes</b>      | Cd, Pb, Cr, Cu, Zn e Ni           | Irrigação                      | Acúmulo no solo e nas plantas    | Ziegler Rivera <i>et al.</i> (2023); Hassan <i>et al.</i> (2024) |
| <b>Atividades industriais</b>             | As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn       | Efluentes, emissões e resíduos | Contaminação de solos e águas    | Romero-Crespo <i>et al.</i> (2023); Senila <i>et al.</i> (2023)  |
| <b>Mineração e beneficiamento mineral</b> | As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn e Hg   | Rejeitos, drenagem e poeiras   | Contaminação persistente         | Romero-Crespo <i>et al.</i> (2023); Senila <i>et al.</i> (2023)  |
| <b>Deposição atmosférica</b>              | Cd e outros elementos-traço       | Deposição no solo e folhas     | Absorção radicular e foliar      | Liu <i>et al.</i> (2024); Wan <i>et al.</i> (2024)               |
| <b>Tráfego, combustão e fundição</b>      | Elementos-traço diversos          | Emissões atmosféricas          | Enriquecimento de áreas próximas | Liu <i>et al.</i> (2024); Wan <i>et al.</i> (2024)               |
| <b>Resíduos urbanos e industriais</b>     | As, Cd, Pb e Zn                   | Lixiviação e escoamento        | Fonte secundária de contaminação | Halder <i>et al.</i> (2022); Wan <i>et al.</i> (2024)            |
| <b>Fontes naturais/geogênicas</b>         | Variável conforme a geologia      | Intemperismo de rochas         | Elevação dos níveis naturais     | Wan <i>et al.</i> (2024); Romero-Crespo <i>et al.</i> (2023)     |

**Fonte:** Autores (2026)

Entre os insumos agrícolas, os fertilizantes fosfatados constituem importante fonte de Cd e outros elementos-traço, uma vez que as rochas fosfáticas utilizadas em sua fabricação apresentam concentrações variáveis desses contaminantes conforme sua origem geológica (Suciu *et al.*, 2022; Hu *et al.*, 2024). Aplicações sucessivas podem favorecer seu enriquecimento no solo, dependendo da concentração, dose e tempo de utilização do fertilizante (Hu *et al.*, 2024; Wan *et al.*, 2024). Adubos orgânicos, esterco e compostos também podem introduzir elementos-traço quando produzidos a partir de matérias-primas contaminadas, reforçando a importância do controle de sua composição (Chen *et al.*, 2024; Wan *et al.*, 2024). Entretanto, o impacto desses insumos depende de sua procedência e manejo, podendo determinados corretivos reduzir a mobilidade de alguns metais por modificações nas propriedades químicas do solo (Kumar; Radziemska, 2022; Sachdeva *et al.*, 2023).

A qualidade da água de irrigação representa outra importante via de introdução de MPTs, sobretudo em regiões com escassez hídrica, expansão urbana ou utilização de águas residuárias (Ziegler Rivera *et al.*, 2023; Hassan *et al.*, 2024). Efluentes insuficientemente tratados podem transportar Cd, Pb, Cr, Cu, Zn e Ni, que, mediante irrigação contínua, podem acumular-se no solo ou ser transferidos para as plantas, conforme as características dos elementos e as condições edáficas (Ziegler Rivera *et al.*, 2023; Hassan *et al.*, 2024). Estudos com hortaliças irrigadas com efluentes da indústria têxtil demonstraram que maiores cargas de metais na água podem resultar em maior acúmulo no sistema solo-planta, embora a intensidade dessa transferência varie entre elementos e espécies vegetais (Hassan *et al.*, 2024; Ziegler Rivera *et al.*, 2023). Portanto, o uso agrícola dessas

águas requer avaliação de sua qualidade química e dos possíveis efeitos cumulativos decorrentes da irrigação prolongada.

Atividades industriais e de mineração também representam fontes relevantes de MPTs em áreas agrícolas influenciadas por efluentes, rejeitos, poeiras e emissões (Romero-Crespo *et al.*, 2023; Senila *et al.*, 2023). A extração e o beneficiamento mineral podem mobilizar elementos presentes nos minérios e rochas, favorecendo sua dispersão para solos e recursos hídricos utilizados na agricultura (Romero-Crespo *et al.*, 2023; Senila *et al.*, 2023). Em áreas agrícolas influenciadas por mineração foram detectados As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn em solos e culturas, enquanto a ocorrência de Hg em hortas próximas a antigas regiões mineradoras evidencia que passivos ambientais podem permanecer como fontes de exposição mesmo após o encerramento das atividades produtivas (Romero-Crespo *et al.*, 2023; Senila *et al.*, 2023).

A deposição atmosférica constitui outra rota de transferência, associada principalmente a emissões industriais, fundição de minérios, combustão e tráfego veicular (Wan *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2024). Partículas contendo elementos-traço podem depositar-se sobre o solo ou diretamente nas superfícies foliares, permitindo a incorporação de contaminantes por vias distintas da absorção radicular (Liu *et al.*, 2024; Wan *et al.*, 2024). Evidências isotópicas demonstraram a contribuição do Cd atmosférico para os teores encontrados em tecidos vegetais, indicando a relevância da absorção foliar em áreas submetidas a emissões (Liu *et al.*, 2024; Wan *et al.*, 2024). Paralelamente, o descarte inadequado de resíduos urbanos e industriais pode enriquecer os solos com As, Cd, Pb e Zn, transformando áreas de disposição de resíduos em fontes

secundárias de contaminação agrícola (Halder *et al.*, 2022; Wan *et al.*, 2024).

Entretanto, a concentração total de um metal no solo não corresponde necessariamente à fração disponível para absorção pelas hortaliças, pois sua mobilidade e biodisponibilidade dependem da especiação química e das propriedades físico-químicas do solo (Kumar; Radziemska, 2022; Ziegler Rivera *et al.*, 2023). O pH exerce papel central, visto que a acidificação geralmente aumenta a solubilidade de metais catiônicos, enquanto valores mais elevados podem favorecer adsorção ou precipitação, embora o comportamento varie entre os elementos (Ziegler Rivera *et al.*, 2023; Sachdeva *et al.*, 2023). A matéria orgânica pode imobilizar metais por complexação ou, em determinadas condições, aumentar sua mobilidade mediante a formação de complexos solúveis (Ziegler Rivera *et al.*, 2023; Kumar; Radziemska, 2022). Textura, argila, óxidos de Fe e Mn, capacidade de troca catiônica, salinidade e condições de oxirredução também interferem na disponibilidade dos contaminantes (Kumar; Radziemska, 2022; Ziegler Rivera *et al.*, 2023).

Assim, a avaliação da contaminação em sistemas hortícolas deve integrar as fontes de MPTs às condições ambientais que determinam seu destino e disponibilidade. Fertilizantes, resíduos orgânicos, águas residuárias, atividades industriais e mineradoras, deposição atmosférica e descarte inadequado de resíduos constituem fontes cuja importância efetiva depende do manejo, da qualidade da água e das propriedades do solo (Wan *et al.*, 2024; Romero-Crespo *et al.*, 2023). Essa abordagem integrada permite compreender com maior precisão a transferência dos contaminantes no sistema solo-água-planta e, conseqüentemente, seu potencial de incorporação às partes comestíveis das hortaliças.

### **3.3. Absorção, Translocação e Bioacumulação de Metais Potencialmente Tóxicos em Hortaliças**

A transferência de metais potencialmente tóxicos (MPTs) para hortaliças envolve sua disponibilidade no solo ou na água de irrigação, absorção pelo sistema radicular, transporte entre tecidos e posterior retenção ou redistribuição para os órgãos comestíveis. A concentração total do elemento no solo não determina, isoladamente, sua incorporação pela planta, pois a fração disponível às raízes depende da especiação química, das interações com a fase sólida e das condições da rizosfera (Liu *et al.*, 2023; Seyfferth *et al.*, 2024). A natureza do elemento também influencia esse processo: o Cd apresenta, em muitas condições, maior mobilidade no sistema solo-planta e capacidade de transferência para a parte aérea, enquanto o Pb tende a permanecer retido no solo e nas raízes (Lin *et al.*, 2024; Seyfferth *et al.*, 2024). Assim, a concentração nos tecidos comestíveis resulta da interação entre disponibilidade ambiental, absorção radicular e eficiência de transporte no vegetal (Zhao *et al.*, 2022; Lin *et al.*, 2024).

A absorção radicular constitui uma das principais vias de entrada dos MPTs e ocorre após a aproximação das espécies químicas disponíveis à superfície das raízes, seguida de interação com a parede celular e eventual passagem pela membrana plasmática (Zhao *et al.*, 2022; Lin *et al.*, 2024). Alguns elementos utilizam proteínas envolvidas na aquisição de nutrientes essenciais; no caso do Cd, transportadores relacionados ao transporte de Fe, Zn e outros cátions, como NRAMP, ZIP/IRT e HMA, participam de sua absorção, efluxo e redistribuição nos tecidos (Zhao *et al.*, 2022; Lin *et al.*, 2024). A intensidade desse processo é condicionada pelo pH, capacidade de troca de cátions, composição mineral, matéria orgânica e

atividade microbiana, fatores que alteram a mobilidade e a fitodisponibilidade dos elementos na rizosfera (Liu *et al.*, 2023; Rahman *et al.*, 2024).

Após a absorção, a distribuição dos MPTs depende do equilíbrio entre retenção radicular e transferência para a parte aérea. A parede celular atua como importante barreira, adsorvendo ou complexando íons metálicos e reduzindo a fração que alcança os tecidos vasculares (Lin *et al.*, 2024; Rahman *et al.*, 2024). No interior celular, a complexação com ligantes e o sequestro em vacúolos constituem mecanismos de detoxificação que restringem a circulação dos elementos (Zhao *et al.*, 2022; Lin *et al.*, 2024). Por isso, elevada absorção radicular não implica necessariamente maior concentração na parte aérea, sendo observados fatores de translocação inferiores à unidade para diferentes combinações entre espécies e elementos (Ba *et al.*, 2024; Iftikhar-UI-Haq *et al.*, 2025).

A fração que supera essas barreiras pode alcançar o sistema vascular, sendo o carregamento no xilema fundamental para a transferência da raiz à parte aérea, processo influenciado pelo fluxo transpiratório e, posteriormente, por mecanismos de redistribuição entre órgãos (Zhao *et al.*, 2022; Lin *et al.*, 2024). A mobilidade interna varia entre elementos: o Cd pode apresentar transferência relativamente eficiente para as folhas, enquanto o Pb geralmente possui mobilidade sistêmica mais restrita e maior retenção radicular (Seyfferth *et al.*, 2024; Rahman *et al.*, 2024). Em hortaliças folhosas, entretanto, a presença de Pb nos tecidos comestíveis também pode decorrer da deposição de partículas e contaminação superficial, não devendo ser atribuída exclusivamente à translocação radicular (Seyfferth *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2023).

Nesse contexto, a bioacumulação resulta do balanço entre entrada, retenção, transporte e compartimentalização ao longo do contínuo solo/água-raiz-parte aérea-órgão comestível. Estudos que avaliam simultaneamente solo, raízes e tecidos aéreos demonstram que bioconcentração e translocação podem apresentar comportamentos distintos para um mesmo elemento (Ba *et al.*, 2024; Iftikhar-UI-Haq *et al.*, 2025). Esses processos dependem da combinação entre elemento, espécie vegetal e condições de cultivo, não sendo adequado extrapolar índices de transferência indistintamente entre culturas e ambientes (Lin *et al.*, 2024; Seyfferth *et al.*, 2024). Os principais mecanismos envolvidos na absorção, retenção, translocação e bioacumulação de MPTs em hortaliças, bem como os fatores que modulam esses processos, são sintetizados na Tabela 2.

**Tabela 2.** Principais processos envolvidos na absorção, translocação e bioacumulação de metais potencialmente tóxicos em hortaliças

| Processo/fator               | Mecanismo principal                                       | Principais condicionantes                         | Comportamento/implicação                                                        | Autores                                                  |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Disponibilidade na rizosfera | Fração disponível do metal entra em contato com as raízes | pH, matéria orgânica, CTC, minerais e microbiota  | A concentração total no solo não representa necessariamente a fração absorvível | Liu <i>et al.</i> (2023); Seyfferth <i>et al.</i> (2024) |
| Absorção radicular           | Entrada pelas raízes e passagem pela                      | Especiação química e atividade de transportadores | Principal via de entrada de MPTs provenientes                                   | Zhao <i>et al.</i> (2022); Lin <i>et al.</i> (2024)      |

|                               |                                                          |                                                  |                                                                         |                                                               |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
|                               | membrana plasmática                                      |                                                  | do solo e da água                                                       |                                                               |
| Transporte por proteínas      | Uso de sistemas de transporte de nutrientes essenciais   | Expressão de NRAMP, ZIP/IRT e HMA                | Cd pode utilizar transportadores relacionados a Fe, Zn e outros cátions | Zhao <i>et al.</i> (2022); Lin <i>et al.</i> (2024)           |
| Retenção radicular            | Adsorção na parede celular e complexação intracelular    | Capacidade de complexação e compartimentalização | Pode limitar a transferência para a parte aérea                         | Lin <i>et al.</i> (2024); Rahman <i>et al.</i> (2024)         |
| Sequestro vacuolar            | Armazenamento do metal em compartimentos celulares       | Capacidade fisiológica de detoxificação          | Reduz a circulação do metal nos tecidos vegetais                        | Zhao <i>et al.</i> (2022); Lin <i>et al.</i> (2024)           |
| Translocação raiz–parte aérea | Carregamento e transporte pelo xilema                    | Fluxo transpiratório e mobilidade do elemento    | Cd tende a apresentar maior mobilidade que Pb                           | Zhao <i>et al.</i> (2022); Seyfferth <i>et al.</i> (2024)     |
| Bioacumulação                 | Balanço entre absorção, retenção, transporte e sequestro | Espécie, elemento e condições de cultivo         | A acumulação varia entre raiz, folhas e demais órgãos                   | Ba <i>et al.</i> (2024); Iftikhar-UI-Haq <i>et al.</i> (2025) |
| Espécie e cultivar            | Diferenças fisiológicas e genéticas                      | Arquitetura radicular, transportadores e         | Cultivares podem apresentar diferentes                                  | Zhao <i>et al.</i> (2022); Lin <i>et al.</i> (2024)           |

|                              |                                              | exclusão/sequestro                                  | níveis de acumulação                                                                 |                                                                      |
|------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Hortaliças folhosas          | Translocação interna e deposição superficial | Área foliar e exposição ambiental                   | Folhas podem acumular metais por absorção e deposição de partículas                  | Seyfferth <i>et al.</i> (2024); Rahman <i>et al.</i> (2024)          |
| Raízes comestíveis           | Acúmulo direto em estruturas subterrâneas    | Retenção radicular e contato com o solo             | A retenção nas raízes possui maior relevância para o consumo                         | Seyfferth <i>et al.</i> (2024); Iftikhar-Ul-Haq <i>et al.</i> (2025) |
| Frutos e órgãos reprodutivos | Redistribuição interna após absorção         | Mobilidade vascular e compartimentalização          | Elevados níveis em raízes ou folhas não implicam concentração equivalente nos frutos | Zhao <i>et al.</i> (2022); Lin <i>et al.</i> (2024)                  |
| Condições ambientais         | Alteração da disponibilidade e do transporte | pH, água, matéria orgânica, nutrientes e microbiota | Modificam continuamente a absorção e a concentração final no tecido comestível       | Liu <i>et al.</i> (2023); Seyfferth <i>et al.</i> (2024)             |

**Fonte:** Autores (2026)

As características da espécie e do cultivar constituem importantes determinantes da acumulação. Hortaliças cultivadas sob condições semelhantes podem apresentar diferentes fatores de transferência

em razão da arquitetura radicular, fisiologia, demanda nutricional, expressão de transportadores e capacidade de sequestrar ou excluir os elementos absorvidos (Zhao *et al.*, 2022; Lin *et al.*, 2024). Mesmo dentro da mesma espécie, cultivares podem diferir quanto às concentrações nos órgãos comestíveis, especialmente em relação ao Cd, devido a diferenças na absorção, efluxo, sequestração intracelular e transporte para a parte aérea (Lin *et al.*, 2024; Zhao *et al.*, 2022). Essa variabilidade sustenta a seleção de cultivares de baixa acumulação como estratégia complementar para reduzir a entrada de contaminantes na cadeia alimentar (Lin *et al.*, 2024; Seyfferth *et al.*, 2024).

O tipo de órgão consumido também interfere diretamente na exposição alimentar. Nas hortaliças folhosas, a transferência para a parte aérea e a deposição superficial assumem especial importância, pois as folhas correspondem à porção ingerida (Seyfferth *et al.*, 2024; Rahman *et al.*, 2024). Em raízes e estruturas subterrâneas comestíveis, a retenção radicular torna-se diretamente relevante para a segurança do alimento (Seyfferth *et al.*, 2024; Iftikhar-Ul-Haq *et al.*, 2025). Já a transferência para frutos e órgãos reprodutivos exige etapas adicionais de transporte e redistribuição, de modo que concentrações elevadas nas raízes ou folhas não implicam níveis equivalentes nesses tecidos (Zhao *et al.*, 2022; Lin *et al.*, 2024).

Por fim, as condições ambientais modulam continuamente a bioacumulação. Alterações no pH, composição da solução do solo, capacidade de adsorção, matéria orgânica, minerais e atividade microbiana modificam a fração disponível para absorção, mesmo sem alterações expressivas na concentração total do elemento (Liu *et al.*, 2023; Seyfferth *et al.*, 2024). O manejo hídrico e a transpiração também interferem na química da rizosfera e no transporte de

solutos, enquanto interações entre MPTs e nutrientes essenciais podem modificar sua absorção por compartilharem determinados sistemas de transporte (Zhao *et al.*, 2022; Lin *et al.*, 2024). Portanto, a concentração final nos tecidos comestíveis decorre da interação entre disponibilidade ambiental, mecanismos fisiológicos, espécie, cultivar, órgão consumido e condições edafoclimáticas, reforçando a necessidade de integrar análises do solo e da água às concentrações determinadas nos diferentes compartimentos vegetais (Ba *et al.*, 2024; Iftikhar-UI-Haq *et al.*, 2025).

### **3.4. Ocorrência de Metais Potencialmente Tóxicos em Hortaliças Destinadas Ao Consumo Humano**

A ocorrência de metais potencialmente tóxicos (MPTs) em hortaliças destinadas à alimentação humana tem sido documentada em diferentes sistemas de produção, abrangendo espécies folhosas, raízes, tubérculos e hortaliças-fruto. A magnitude da contaminação varia entre espécies e órgãos vegetais em razão de diferenças nos processos de absorção, translocação e retenção dos elementos (Pavlíková *et al.*, 2023; Hassan *et al.*, 2024). Cd, Pb, Cr, Ni e As estão entre os elementos frequentemente investigados devido à sua relevância toxicológica e à possibilidade de transferência do sistema solo-água-planta para a alimentação humana (Orosun *et al.*, 2023; Chowdhury *et al.*, 2024). Entretanto, a detecção desses elementos não caracteriza, isoladamente, risco sanitário, sendo necessário considerar a concentração encontrada, a fração comestível e os limites regulatórios aplicáveis (Hassan *et al.*, 2024; Saleem *et al.*, 2025).

As hortaliças folhosas aparecem frequentemente entre os grupos com maior acumulação de MPTs, embora o comportamento varie

conforme a espécie, o elemento e as condições ambientais (Orosun *et al.*, 2023; Ghosh *et al.*, 2024). Em áreas próximas a Kolkata, na Índia, espinafre-vermelho, *bathua* e coentro apresentaram maior acumulação de Pb, Cd e Ni nas partes comestíveis em comparação à maioria das hortaliças-fruto avaliadas, com concentrações de Pb entre 0,1 e 1,3 mg kg<sup>-1</sup> e de Cd entre 0,07 e 0,20 mg kg<sup>-1</sup> (Ghosh *et al.*, 2024; Chowdhury *et al.*, 2024). Na Tanzânia, couve-chinesa e espinafre também apresentaram concentrações de Pb e Cd reportadas pelos autores como superiores aos referenciais utilizados no estudo (Magesa *et al.*, 2025; Orosun *et al.*, 2023). Em solos provenientes de antiga área de mineração, concentrações elevadas de Cd, Zn e Cr foram observadas em folhas de alface, evidenciando a influência das condições ambientais sobre a acumulação no tecido foliar (Pavlíková *et al.*, 2023; Hassan *et al.*, 2024).

Raízes e estruturas subterrâneas também podem apresentar concentrações relevantes devido ao contato direto com o solo durante o cultivo (Pavlíková *et al.*, 2023; Hassan *et al.*, 2024). Em área anteriormente submetida à mineração, concentrações elevadas de Pb foram registradas em raízes de cenoura e estruturas comestíveis de rabanete, enquanto Cd, Zn e Cr predominaram nas folhas de alface, demonstrando diferenças na distribuição dos elementos entre órgãos vegetais (Pavlíková *et al.*, 2023; Ghosh *et al.*, 2024). Estudos envolvendo diferentes categorias de hortaliças também indicam que raízes e tubérculos podem contribuir para a exposição alimentar a Cd, Pb e outros elementos, embora a intensidade da acumulação apresente ampla variação entre espécies e locais de produção (Chowdhury *et al.*, 2024; Saleem *et al.*, 2025). Esses resultados reforçam que a classificação das hortaliças por grupo botânico não substitui avaliações específicas para cada espécie e contaminante (Pavlíková *et al.*, 2023; Saleem *et al.*, 2025).

Nas hortaliças, frutos como tomate, berinjela, pimentão e pepino, os metais chegam à parte comestível principalmente pela absorção radicular e posterior translocação, já que os frutos não ficam em contato direto com o solo (Hassan *et al.*, 2024; Ghosh *et al.*, 2024). Embora essas hortaliças possam acumular menos Pb, Cd e Ni que as folhosas, concentrações relevantes também são encontradas nesse grupo (Ghosh *et al.*, 2024; Saleem *et al.*, 2025). Em áreas irrigadas com águas residuárias, maiores concentrações de metais na água tendem a aumentar sua presença nos tecidos vegetais (Hassan *et al.*, 2024; Orosun *et al.*, 2023). Mesmo com menor acúmulo relativo, hortaliças-fruto e de vagem podem contribuir para estimativas de risco associadas a Pb e Cr (Chowdhury *et al.*, 2024; Hassan *et al.*, 2024).

A comparação com limites regulatórios deve ser feita com cautela, pois a detecção de um metal não significa, por si só, que o alimento esteja fora do padrão. Há estudos com amostras acima e abaixo dos valores de referência para Cd e Pb, inclusive dentro dos mesmos grupos de hortaliças (Magesa *et al.*, 2025; Saleem *et al.*, 2025). Áreas influenciadas por mineração ou irrigação com água contaminada também tendem a apresentar maiores concentrações, o que reforça a influência das condições locais sobre os resultados (Pavlíková *et al.*, 2023; Hassan *et al.*, 2024). Por isso, resultados de uma região não devem ser generalizados para outros sistemas de produção (Ghosh *et al.*, 2024; Chowdhury *et al.*, 2024).

No Brasil, a avaliação deve considerar os Limites Máximos Tolerados estabelecidos pela Anvisa, especialmente pela Instrução Normativa nº 160/2022 e suas atualizações, de acordo com o alimento e o contaminante analisado (Brasil, 2022a; Brasil, 2022b). Quando pertinente, o *Codex Alimentarius* também pode ser utilizado como

referência (Brasil, 2022b; Codex Alimentarius Commission, 2025). Também é importante verificar se os resultados estão expressos em massa fresca ou seca, pois essas bases não devem ser comparadas diretamente sem conversão (Pavlíková *et al.*, 2023; Saleem *et al.*, 2025). De modo geral, a acumulação varia conforme o metal, a espécie, o órgão vegetal e as condições ambientais, o que reforça a importância do monitoramento de Cd, Pb, As, Cr, Ni e outros MPTs na avaliação da qualidade das hortaliças e da exposição alimentar (Orosun *et al.*, 2023; Chowdhury *et al.*, 2024).

### **3.5. Exposição Alimentar e Riscos à Saúde Humana Associados Ao Consumo de Hortaliças Contaminadas**

A ingestão de alimentos constitui uma das principais vias de exposição humana a metais e metaloides potencialmente tóxicos, especialmente quando culturas alimentares são produzidas em solos contaminados ou irrigadas com água de qualidade inadequada (Zhao *et al.*, 2024; Osae *et al.*, 2023). Em populações não ocupacionalmente expostas, a dieta apresenta particular relevância para elementos como Cd, Pb e As, que podem ser transferidos do ambiente para os tecidos vegetais e, posteriormente, incorporados à alimentação humana (Zhao *et al.*, 2024; Nowar; Islam, 2024). Em hortaliças consumidas frequentemente, a magnitude da exposição depende não apenas da concentração do contaminante, mas também da quantidade e frequência de consumo e da massa corporal do indivíduo (Osae *et al.*, 2023; Chowdhury *et al.*, 2024).

A preocupação toxicológica está particularmente associada à exposição crônica, uma vez que determinados elementos podem provocar efeitos adversos após exposições repetidas, mesmo na ausência de manifestações agudas (Zhao *et al.*, 2024; Mustatea;

Ungureanu, 2024). A exposição prolongada ao Cd está relacionada principalmente à toxicidade renal e óssea, enquanto o Pb apresenta reconhecida neurotoxicidade, sobretudo durante o desenvolvimento infantil (Schaefer *et al.*, 2023; Zhao *et al.*, 2024). O As, por sua vez, está associado a diferentes efeitos crônicos e possui relevância nas avaliações de risco carcinogênico (Zhao *et al.*, 2024; Mustatea; Ungureanu, 2024).

A exposição alimentar pode ser estimada pela ingestão diária estimada (Estimated Daily Intake — EDI), indicador que relaciona a concentração do elemento no alimento à quantidade consumida e, conforme a metodologia empregada, à massa corporal do consumidor (Chowdhury *et al.*, 2024; Osae *et al.*, 2023). Esse parâmetro permite converter as concentrações determinadas nos alimentos em estimativas de exposição comparáveis a referências toxicológicas (Nowar; Islam, 2024; Chowdhury *et al.*, 2024). Entretanto, a concentração do contaminante isoladamente não determina a magnitude do risco, pois este também depende da taxa de ingestão e das características da população exposta (Osae *et al.*, 2023; Mhungu *et al.*, 2023).

Para os efeitos não carcinogênicos, são empregados o Hazard Quotient (HQ) e o Target Hazard Quotient (THQ), que relacionam a exposição estimada a uma dose oral de referência (Chowdhury *et al.*, 2024; Nowar; Islam, 2024). Valores inferiores a 1 indicam que a exposição estimada está abaixo do nível de referência utilizado, enquanto valores superiores a 1 sinalizam potencial preocupação toxicológica e necessidade de avaliação mais aprofundada, sem representar diretamente a probabilidade de ocorrência de doença (Chowdhury *et al.*, 2024; Osae *et al.*, 2023). Estudos conduzidos em diferentes regiões têm identificado HQ ou THQ superiores à unidade

para determinados metais presentes em hortaliças, demonstrando que os resultados variam conforme o elemento, o alimento e o cenário de exposição (Adewoyin *et al.*, 2022; Chowdhury *et al.*, 2024).

Na presença simultânea de múltiplos contaminantes, o Hazard Index (HI), geralmente calculado pela soma dos HQ ou THQ, permite estimar o potencial cumulativo de efeitos não carcinogênicos (Chowdhury *et al.*, 2024; Nowar; Islam, 2024). Valores de HI superiores a 1 indicam potencial preocupação dentro das premissas do modelo e evidenciam a importância de considerar a exposição combinada, uma vez que análises restritas a elementos isolados podem subestimar o risco total (Nowar; Islam, 2024; Adewoyin *et al.*, 2022).

Para elementos com parâmetros de carcinogenicidade disponíveis, o Carcinogenic Risk (CR) estima o incremento teórico do risco de câncer decorrente da exposição ao longo da vida, considerando a dose crônica e o fator de potência carcinogênica adotado (Osae *et al.*, 2023; Chowdhury *et al.*, 2024). Diferentemente do THQ, o CR é interpretado em escala probabilística e sua avaliação deve considerar o critério de aceitabilidade e a fonte dos parâmetros utilizados (Nowar; Islam, 2024; Osae *et al.*, 2023). Estudos com hortaliças têm identificado valores acima dos referenciais adotados para determinados metais, embora os resultados dependam da espécie vegetal, concentração, consumo, massa corporal e duração da exposição (Chowdhury *et al.*, 2024; Mhungu *et al.*, 2023).

A vulnerabilidade também varia entre grupos populacionais. Crianças podem apresentar maior exposição por unidade de massa corporal e, conseqüentemente, indicadores de risco mais elevados em determinados cenários (Zhao *et al.*, 2024; Mhungu *et al.*, 2023). Assim, avaliações mais representativas devem empregar dados

locais de consumo e massa corporal, além de considerar fatores como hábitos alimentares, preparo culinário e biodisponibilidade dos contaminantes (Islam *et al.*, 2022; Nowar; Islam, 2024).

Dessa forma, a contaminação de hortaliças por metais potencialmente tóxicos deve ser analisada de maneira integrada, considerando concentração, frequência e quantidade de consumo, toxicidade do elemento e características da população exposta (Zhao *et al.*, 2024; Nowar; Islam, 2024). Indicadores como EDI, HQ/THQ, HI e CR são complementares na caracterização da exposição e dos potenciais efeitos à saúde, embora dependam dos parâmetros e pressupostos adotados (Chowdhury *et al.*, 2024; Osae *et al.*, 2023). Nesse contexto, o monitoramento sistemático associado a dados locais de consumo constitui ferramenta importante para identificar populações mais expostas e subsidiar estratégias de segurança alimentar e redução da exposição humana (Zhao *et al.*, 2024; Mustatea; Ungureanu, 2024).

#### **4. CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A revisão demonstrou que a bioacumulação de metais potencialmente tóxicos em hortaliças depende da contaminação do solo e da água, da biodisponibilidade dos elementos e das características fisiológicas das espécies cultivadas. Fertilizantes, águas residuárias, atividades industriais e minerárias, deposição atmosférica e descarte inadequado de resíduos constituem importantes fontes de contaminação. Entretanto, a transferência para os alimentos varia conforme fatores como pH, matéria orgânica, especiação química, espécie, cultivar e órgão vegetal.

Foram identificados Cd, Pb, Cr, Ni, As e outros elementos em diferentes grupos de hortaliças, com variações relacionadas às espécies, aos órgãos comestíveis e às condições de cultivo. Hortaliças folhosas e estruturas subterrâneas mostraram-se relevantes em diferentes cenários, embora não seja possível definir um grupo universalmente mais suscetível. A interpretação das concentrações também deve considerar os limites regulatórios específicos, a unidade utilizada e a expressão dos resultados em massa fresca ou seca.

O consumo de hortaliças contaminadas representa uma importante via de exposição humana. Indicadores como EDI, HQ/THQ, HI e CR permitem estimar a exposição e os potenciais riscos não carcinogênicos e carcinogênicos, considerando concentração, frequência e quantidade de consumo, toxicidade do elemento, massa corporal e características da população exposta.

Assim, a segurança das hortaliças exige o monitoramento integrado de solos, águas de irrigação e tecidos comestíveis, associado à avaliação da exposição alimentar. Estudos padronizados e representativos das condições locais são necessários para reduzir incertezas e fortalecer ações de prevenção, monitoramento e proteção da saúde humana.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEWOYIN, O. O. *et al.* Potential toxic elements in market vegetables from urban areas of southwest Nigeria: concentration levels and probabilistic potential dietary health risk among the population. **Journal of Trace Elements and Minerals**, v. 1, art. 100004, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtemin.2022.100004>.

ALI, S.; AHIRWAR, R. Accumulation of toxic metals in vegetable crops and associated dietary exposure risks to human health. **Discover Environment**, v. 3, art. 210, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44274-025-00373-w>.

BA, V.; THIEN, B. N.; PHUONG, H. T.; LOAN, T.; ANH, T. Bioconcentration and translocation of elements from soil to vegetables and associated health risk. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 132, art. 106296, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106296>.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Instrução Normativa – IN nº 160, de 1º de julho de 2022. Estabelece os limites máximos tolerados (LMT) de contaminantes em alimentos. Brasília, DF: ANVISA, 2022a.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução da Diretoria Colegiada – RDC nº 722, de 1º de julho de 2022. Dispõe sobre os limites máximos tolerados de contaminantes em alimentos, os princípios gerais para o seu estabelecimento e os métodos de análise para fins de avaliação de conformidade. Brasília, DF: ANVISA, 2022b.

CAI, L.-M. *et al.* A comprehensive approach for quantifying source-specific ecological and health risks of potentially toxic elements in agricultural soil. **Environmental Research**, v. 263, pt. 2, art. 120163, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120163>.

CARVALHO, M. R. de *et al.* Arsenic, cadmium, and chromium concentrations in contrasting phosphate fertilizers and their bioaccumulation by crops: towards a green label? **Environmental**

**Research**, v. 263, pt. 2, art. 120171, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120171>.

CHEN, K.; LI, J.; LIN, L.; QIN, W.; GAO, Y.; HU, E.; JIANG, J. Occurrence, fate and control strategies of heavy metals and antibiotics in livestock manure compost land application: a review. **Science of the Total Environment**, v. 957, art. 177381, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177381>.

CHOWDHURY, A. I. *et al.* Human health risk assessment of heavy metals in vegetables of Bangladesh. **Scientific Reports**, v. 14, art. 15616, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65734-6>.

CODEX ALIMENTARIUS COMMISSION. General standard for contaminants and toxins in food and feed: CXS 193-1995. Rome: FAO/WHO, 2025.

GHOSH, P.; CHATTERJEE, A.; SHARAFF, M.; PAL, H. Unveiling the threat of lead, cadmium, and nickel toxicity in salient commercially grown vegetables in Kolkata, India. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 197, art. 41, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13471-8>.

HALDER, M. *et al.* Are the vegetables grown in the soil of municipal solid waste dumping sites safe for human health? An assessment from trace elements contamination and associated health risks. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v. 18, art. 100731, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2022.100731>.

HASSAN, J. *et al.* Assessment of heavy metals accumulation by vegetables irrigated with different stages of textile wastewater for evaluation of food and health risk. **Journal of Environmental**

**Management**, v. 353, art. 120206, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120206>.

HU, J. *et al.* Evidence for the accumulation of toxic metal(loid)s in agricultural soils impacted from long-term application of phosphate fertilizer. **Science of the Total Environment**, v. 907, art. 167863, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167863>.

IFTIKHAR-UL-HAQ *et al.* Multivariate analysis of potentially toxic metal contents in soil and vegetables: enrichment, bioconcentration, translocation from soil to vegetables, and assessment of human health toxicity. **Food and Chemical Toxicology**, v. 200, art. 115413, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fct.2025.115413>.

ISLAM, M. S. *et al.* Potentially toxic elements in vegetable and rice species in Bangladesh and their exposure assessment. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 106, art. 104350, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104350>.

JAHANDARI, A.; ABBASNEJAD, B. Environmental pollution status and health risk assessment of selective heavy metal(oid)s in Iran's agricultural soils: a review. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 253, art. 107330, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2023.107330>.

JALALI, M.; MEYARI, A. Heavy metal contents, soil-to-plant transfer factors, and associated health risks in vegetables grown in western Iran. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 106, art. 104316, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104316>.

JALIL, A.; NOOR, M. J.; IRAM, S.; QAISAR, I. A systematic review: global trend in heavy metal concentration in vegetables, dietary exposure, and health risk assessment. **Environmental Monitoring and**

**Assessment**, v. 198, n. 3, art. 252, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-026-15103-9>.

KUMAR, V.; RADZIEMSKA, M. Impact of physiochemical properties, microbes and biochar on bioavailability of toxic elements in the soil: a review. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 44, n. 11, p. 3725–3742, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10653-021-01157-w>.

LIN, L. *et al.* Mechanisms of low cadmium accumulation in crops: a comprehensive overview from rhizosphere soil to edible parts. **Environmental Research**, v. 245, art. 118054, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.118054>.

LIU, J.; LI, Y.; XU, Q. *et al.* Dealing with elemental toxicities in crops: hot topics and likely solutions. **Plant and Soil**, v. 505, p. 209–223, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06714-7>.

LIU, X. *et al.* Sporadic Pb accumulation by plants: influence of soil biogeochemistry, microbial community and physiological mechanisms. **Journal of Hazardous Materials**, v. 444, art. 130391, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130391>.

MAGESA, F.; KIBACHA, E. E.; KAMDULI, Y. P.; MNG'ONG'O, M. E. Lead and cadmium levels in selected leafy vegetables and their implications for public health, Mbeya, Tanzania. **Food and Humanity**, v. 4, art. 100607, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2025.100607>.

MHUNGU, F.; CHENG, Y.; ZHOU, Z.; ZHANG, W.; LIU, Y. Estimation of the cumulative risks from dietary exposure to cadmium, arsenic, nickel, lead and chromium in Guangzhou, China. **Food and**

**Chemical Toxicology**, v. 178, art. 113887, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fct.2023.113887>.

MUSTATEA, G.; UNGUREANU, E. L. Assessing the presence and health risks of potentially toxic metals in food: a comprehensive overview. **Exploration of Foods and Foodomics**, v. 2, p. 471–496, 2024. DOI: <https://doi.org/10.37349/eff.2024.00047>.

NIEDER, R. *et al.* Potentially toxic elements in the environment: a review of sources, sinks, pathways and mitigation measures. **Reviews on Environmental Health**, v. 39, n. 3, p. 561–575, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1515/reveh-2022-0161>.

NOWAR, A.; ISLAM, M. H. A systematic review on heavy metals contamination in Bangladeshi vegetables and their associated health risks. **Frontiers in Environmental Science**, v. 12, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1425286>.

OROSUN, M. M. *et al.* Potentially toxic metals in irrigation water, soil, and vegetables and their health risks using Monte Carlo models. **Scientific Reports**, v. 13, art. 21220, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48489-4>.

OSAE, R.; NUKPEZAH, D.; DARKO, D. A.; KORANTENG, S. S.; MENSAH, A. Accumulation of heavy metals and human health risk assessment of vegetable consumption from a farm within the Korle lagoon catchment. **Heliyon**, v. 9, n. 5, art. e16005, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16005>.

PAGE, M. J. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, v. 372, art. n71, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>

PAVLÍKOVÁ, D.; ZEMANOVÁ, V.; PAVLÍK, M. Health risk and quality assessment of vegetables cultivated on soils from a heavily polluted old mining area. **Toxics**, v. 11, n. 7, art. 583, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics11070583>.

RAHMAN, S. U. *et al.* Pb uptake, accumulation, and translocation in plants: plant physiological, biochemical, and molecular response: a review. **Heliyon**, v. 10, n. 6, art. e27724, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27724>.

RASHID, A.; SCHUTTE, B. J.; ULERY, A.; DEYHOLOS, M. K.; SANOGO, S.; LEHNHOFF, E. A.; BECK, L. Heavy metal contamination in agricultural soil: environmental pollutants affecting crop health. **Agronomy**, v. 13, n. 6, art. 1521, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13061521>.

REIS, G. A. *et al.* Contamination by potentially toxic elements (PTEs) in agricultural products grown around Sepetiba Bay, Rio de Janeiro State (SE Brazil). **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 89, n. 2, p. 195–220, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00244-025-01143-8>.

ROMERO-CRESPO, P. *et al.* Trace elements in farmland soils and crops, and probabilistic health risk assessment in areas influenced by mining activity in Ecuador. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 45, p. 4549–4563, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01514-x>.

SACHDEVA, S.; KUMAR, R.; SAHOO, P. K.; NADDA, A. K. Recent advances in biochar amendments for immobilization of heavy metals in an agricultural ecosystem: a systematic review. **Environmental Pollution**, v. 319, art. 120937, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120937>.

SALEEM, M.; WANG, Y.; PIERCE, D.; SENS, D. A.; SOMJI, S.; GARRETT, S. H. Concentration and potential non-carcinogenic and carcinogenic health risk assessment of metals in locally grown vegetables. **Foods**, v. 14, n. 13, art. 2264, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods14132264>.

SCHAEFER, H. R. *et al.* Reassessment of the cadmium toxicological reference value for use in human health assessments of foods. **Regulatory Toxicology and Pharmacology**, art. 105487, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2023.105487>.

SENILA, M.; LEVEL, E. A.; FRENTIU, T.; MIHALI, C.; ANGYUS, S. B. Assessment of mercury bioavailability in garden soils around a former nonferrous metal mining area using DGT, accumulation in vegetables, and implications for health risk. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 195, n. 12, art. 1554, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-023-12144-2>.

SEYFFERTH, A. L.; LIMMER, M. A.; RUNKLE, B. R. K.; CHANEY, R. L. Mitigating toxic metal exposure through leafy greens: a comprehensive review contrasting cadmium and lead in spinach. **GeoHealth**, v. 8, n. 6, art. e2024GH001081, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1029/2024GH001081>.

SOUZA, R. E. de; FONTES, M. P. F.; TUCCI, C. A. F.; LIMA, H. N.; FERREIRA, M. da S. Health risk assessment and quality reference values of potentially toxic elements in soils of the Southwestern Amazonas State – Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 912, art. 168937, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168937>.

SUCIU, N. A.; DE VIVO, R.; RIZZATI, N.; CAPRI, E. Cd content in phosphate fertilizer: which potential risk for the environment and human health? **Current Opinion in Environmental Science &**

**Health**, v. 30, art. 100392, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2022.100392>.

TANG, Z.; WANG, H.-Q.; CHEN, J.; CHANG, J.-D.; ZHAO, F.-J. Molecular mechanisms underlying the toxicity and detoxification of trace metals and metalloids in plants. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 65, n. 2, p. 570–593, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1111/jipb.13440>.

WAN, Y.; LIU, J. Heavy metals in agricultural soils: sources, influencing factors, and remediation strategies. **Toxics**, v. 12, n. 1, art. 63, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics12010063>.

ZHAO, D.; WANG, P.; ZHAO, F.-J. Toxic metals and metalloids in food: current status, health risks, and mitigation strategies. **Current Environmental Health Reports**, v. 11, n. 4, p. 468–483, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40572-024-00462-7>.

ZHAO, F.-J.; TANG, Z.; SONG, J.-J.; HUANG, X.-Y.; WANG, P. Toxic metals and metalloids: uptake, transport, detoxification, phytoremediation, and crop improvement for safer food. **Molecular Plant**, v. 15, n. 1, p. 27–44, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molp.2021.09.016>.

ZIEGLER RIVERA, F. R. A. *et al.* Impact of the change in irrigation practices from untreated to treated wastewater on the mobility of potentially toxic elements (PTEs) in soil irrigated for decades. **Journal of Soils and Sediments**, v. 23, p. 2726–2743, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-023-03518-7>.

---

<sup>1</sup> Doutoranda em Geografia pela Universidade Estadual Paulista (UNESP) e-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

<sup>2</sup> Mestrando em Agricultura e Ambiente pela Universidade Federal de Alagoas *Campus* Arapiraca e-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

<sup>3</sup> Mestrando em Agricultura e Ambiente pela Universidade Federal de Alagoas *Campus* Arapiraca e-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

<sup>4</sup> Mestrando em Ciências Agrárias UTFPR. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

<sup>5</sup> Doutora em Fitotecnia pela Universidade Federal de Viçosa e-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

<sup>6</sup> Mestre em Agricultura e Ambiente pela Universidade Federal de Alagoas *Campus* Arapiraca e-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

<sup>7</sup> Graduada em Ciências Biológicas. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

<sup>8</sup> Doutoranda em Química e Biotecnologia pela Universidade Federal de Alagoas. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

<sup>9</sup> Mestranda em Química e Biotecnologia pela Universidade Federal de Alagoas. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)