

IDENTIFICAÇÃO DE METAIS TÓXICOS EM FERTILIZANTES FOSFATADOS: UMA REVISÃO DE BIBLIOGRÁFICA.

Sávio Rodrigues Soares*

James Michael Silva*

Vanessa Nunes Alves*

Resumo: A pesquisa visou compilar e examinar estudos recentes sobre a detecção de metais potencialmente nocivos, como cádmio, chumbo, níquel e cromo, presentes em fertilizantes fosfatados utilizados na agricultura. A revisão considera as principais metodologias analíticas aplicadas na identificação desses elementos, incluindo espectrometria de absorção atômica (AAS), espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES) e espectrometria de massas com plasma acoplado indutivamente (ICP-MS). Além disso, analisou os métodos de preparo e digestão das amostras, como a digestão ácida assistida por micro-ondas. A relevância ambiental dessa pesquisa reside na análise do potencial de contaminação do solo e das águas subterrâneas por metais pesados resultantes da aplicação contínua desses fertilizantes, contribuindo para a compreensão dos riscos relativos à qualidade ambiental e para a formulação de estratégias de monitoramento e controle de poluentes em sistemas agrícolas.

Palavras-chave: metais pesados, fertilizantes fosfatados, contaminantes.

* Instituto de Química – UFCAT: savio.rodrigues@ufabc.edu.br, james.silva19@discente.ufcat.edu.br, vanessa.nunes@ufcat.edu.br

1. INTRODUÇÃO

A intensificação da produção agrícola em nível global tem sido fortemente dependente da utilização de fertilizantes minerais, sobretudo em um cenário marcado por projeções de aumento contínuo da demanda por alimentos nas próximas décadas. (CHMIELEWSKA A.L et al., 2025). Os fertilizantes fosfatados são de grande importância na agricultura, pois fornecem o fósforo (P), um nutriente essencial para o desenvolvimento das plantas. O fósforo desempenha papel central nos processos fisiológicos das plantas, atuando diretamente na formação de estruturas reprodutivas e radiculares, na constituição dos tecidos vegetais e nos mecanismos bioquímicos responsáveis pela transferência e armazenamento de energia. (MARDAMOOTOO, T. et al., 2021).

A aplicação de fertilizantes fosfatados aumenta a disposição de fósforo no solo, que garante o aumento de rendimentos e eficácia no uso de outros nutrientes, especialmente o nitrogênio (JOHNSTON, A. E et al., 2019). Além disso, o uso de fertilizantes fosfatados ajuda na formação de reservas de fósforo no solo, o que é de grande valor em sistemas agrícolas de longo prazo, permitindo que as culturas aproveitem esses estoques internos, mesmo sem constante aplicação de fertilizantes. Isso implica em uma elevação de produtividade agrícola e aumento na segurança alimentar (JOHNSTON, A. E et al., 2019).

No entanto, além dos demais benefícios agrônômicos de desenvolvimento vegetal, a aplicação desses insumos pode também carregar consigo riscos à saúde e ao meio ambiente que muitas vezes são negligenciados. Assim, diversos estudos têm demonstrado que fertilizantes fosfatados podem conter concentrações variáveis de elementos potencialmente tóxicos, incluindo cádmio, chumbo, níquel, cromo e zinco, os quais não possuem função agrônômica e representam risco ambiental. (CHMIELEWSKA A.L et al., 2025).

Esses elementos não são adicionados intencionalmente, mas provêm da matéria-prima utilizada na fabricação, especialmente das rochas fosfáticas. Dependendo da origem geológica, essas rochas podem conter teores variados de contaminantes, sendo o Cd um dos que mais apresenta preocupação devido à sua alta toxicidade e capacidade de acumulação nos solos e nas cadeias alimentares (SUCIU N. A et al., 2022). Trabalhadores envolvidos na produção, manipulação e aplicação desses fertilizantes são constantemente expostos, seja por via inalatória, dérmica ou ingestão acidental (WENTAO J et al., 2012).

Além da contribuição natural decorrente da composição geoquímica das rochas fosfáticas, os processos industriais envolvidos na produção de fertilizantes podem introduzir ou concentrar ainda mais metais potencialmente tóxicos, em função das etapas de beneficiamento, acidulação e concentração do fósforo, o que pode resultar no enriquecimento de elementos como cádmio, chumbo, níquel e cromo no produto final (SUCIU et al., 2022). Essa concentração adicional amplia os riscos ambientais associados ao uso desses insumos, especialmente quando aplicados de forma contínua em sistemas agrícolas intensivos (NIÑO-SAVALA et al., 2019).

A utilização contínua de fertilizantes fosfatados contendo impurezas metálicas pode promover o acúmulo gradual desses elementos no solo (RAMALHO, J. F. G. P.

et al 2024). Como consequência, ocorre o aumento gradual da biodisponibilidade desses metais, elevando o potencial de absorção pelas plantas e sua transferência ao longo da cadeia alimentar, com impactos diretos sobre a qualidade dos ecossistemas agrícolas, a segurança dos alimentos e a saúde humana, conforme evidenciado por estudos recentes (HU et al., 2024; Guimarães et al., 2015).).

Adicionalmente, o presente trabalho tem o intuito de examinar criticamente as principais metodologias analíticas empregadas na determinação desses elementos, bem como os procedimentos de preparo e digestão de amostras, avaliando sua adequação, sensibilidade e aplicabilidade em estudos ambientais. Ao reunir e comparar resultados provenientes de diferentes contextos geográficos e analíticos, este trabalho pretende contribuir para uma compreensão mais abrangente dos potenciais riscos ambientais associados ao uso contínuo de fertilizantes fosfatados, especialmente no que se refere à acumulação de metais tóxicos no solo, à possível transferência para a cadeia alimentar e às implicações para a qualidade dos ecossistemas e a saúde humana. Por fim, a revisão busca fornecer subsídios técnicos que possam apoiar estratégias de monitoramento, avaliação de risco e controle da contaminação por metais em sistemas agrícolas.

Sistemática de revisão.

A pesquisa foi desenvolvida a partir de uma abordagem sistemática para a identificação, seleção e análise crítica de estudos científicos que abordam os teores de metais potencialmente tóxicos em fertilizantes fosfatados utilizados na agricultura. A estratégia de busca foi elaborada com o objetivo de abranger a literatura internacional mais relevante e atualizada sobre o tema, sendo realizada nas bases de dados Scopus e Web of Science, no período compreendido entre janeiro de 2010 e julho de 2024.

Foram utilizadas combinações de descritores em inglês, empregando operadores, tais como ("phosphate fertilizer" or "phosphorus fertilizer"), ("heavy metal" or cadmium, lead, nickel, chromium, zinc, arsenic or cobalt) e ("contaminants" or "toxic metals") de modo a maximizar a recuperação de estudos relacionados à presença de metais em fertilizantes fosfatados.

Como critérios de inclusão, foram considerados apenas artigos recentes publicados em periódicos científicos revisados por pares que reportassem dados quantitativos sobre as concentrações de metais como cádmio, chumbo, níquel, cromo, zinco, arsênio e cobalto em fertilizantes fosfatados comerciais. Foram considerados estudos que abordassem exclusivamente resíduos industriais, solos agrícolas, sedimentos ou tecidos vegetais, sem a análise direta do fertilizante, bem como revisões bibliográficas, notas técnicas e trabalhos experimentais sem dados analíticos mensuráveis, foram excluídos da análise.

As informações extraídas dos estudos selecionados foram sistematizadas em planilha eletrônica (Microsoft Excel®), contendo dados referentes aos autores, ano de publicação, país onde o estudo foi conduzido, tipo de fertilizante analisado, teores dos metais determinados (expressos em mg kg^{-1}), técnica analítica empregada, método

de preparo e digestão das amostras, bem como o número de amostras avaliadas em cada estudo.

A análise dos dados consistiu em uma síntese descritiva dos resultados reportados, permitindo a comparação entre diferentes regiões geográficas, tipos de fertilizantes e metodologias analíticas, além da confrontação dos teores observados com limites regulatórios estabelecidos por normas internacionais. Essa abordagem possibilitou a identificação de padrões de ocorrência, variabilidade regional e potenciais riscos ambientais associados ao uso contínuo de fertilizantes fosfatados contaminados por metais potencialmente tóxicos.

RESULTADOS

Métodos de Digestão e Preparação de Amostras

A (tabela 1) apresenta uma visão comparativa que abrange estratégias metodológicas empregadas na digestão e preparação de amostras de fertilizantes fosfatados para análise elementar. Esta etapa pré-analítica é de grande importância, pois determina a eficiência de transferência dos elementos de interesse da matriz sólida e complexa do fertilizante para uma solução homogênea, impactando diretamente a precisão, exatidão e confiabilidade dos resultados obtidos por técnicas instrumentais como ICP-OES, ICP-MS, AAS e XRF. A diversidade de métodos reflete não apenas a evolução das técnicas analíticas, mas também as adaptações necessárias frente aos diferentes tipos de amostras (SSP, TSP, MAP, DAP, fosfato de rocha, NPK, orgânicos), aos elementos-alvo e aos recursos laboratoriais disponíveis em diferentes contextos geográficos e de pesquisa.

Observa-se uma clara distinção entre duas grandes abordagens: os métodos destrutivos, baseados em digestão ácida, e os métodos não destrutivos ou de preparação física. Dentro dos métodos destrutivos, há uma subdivisão marcante entre as técnicas convencionais em sistema aberto e as técnicas modernas em sistema fechado assistidas por micro-ondas. Os métodos em sistema aberto, como os utilizados por El-Taher & Althoyaib (2012) com HCl concentrado e por Elisha & Elisha (2014) com mistura de HCl/HNO₃ em ebulição prolongada, são amplamente difundidos devido à sua simplicidade instrumental e baixo custo inicial. No entanto, estes métodos carregam desvantagens intrínsecas, como o elevado risco de contaminação por partículas atmosféricas, a potencial perda de elementos voláteis ou semi-voláteis (As, Se, Hg) durante a evaporação e o aquecimento prolongado, e o maior consumo de reagentes e tempo do analista. Apesar disso, quando bem controlados e validados, podem fornecer dados satisfatórios para muitos cátions, sendo uma opção viável em laboratórios com recursos limitados.

Uma evolução dentro dos métodos de placa de aquecimento é o uso de misturas ácidas oxidantes mais eficientes, destacadas nos trabalhos de Ahmad & Anvari (2020) e Nunor et al. (2014), que empregaram HNO₃:H₂O₂. O ácido nítrico atua como um potente agente oxidante para a matéria orgânica e muitos compostos

Tabela 1 – Métodos de digestão e preparação de amostras para análise elementar em fertilizantes fosfatados, segundo a literatura internacional.

Referência	Região	Tipo de amostra	Método de digestão	Observações
El-Taher & Althoyaib (2012)	Arábia Saudita	SSP, TSP	Digestão com HCl concentrado, evaporação, redissolução em HCl 0,1 M, filtração (Whatman nº 2).	5 g + 10 mL HCl conc., 30 min aquecimento.
Cheraghi et al. (2012)	Irã	Solo	Água régia (HCl/HNO ₃ 3:1) + HClO ₄ .	Digestão em micro-ondas para ICP-OES. INAA direto.
Saueia et al. (2013)	Brasil	SSP, TSP, MAP, DAP,	Sem digestão. Preparação física: moagem, secagem, pelletização para XRF.	Digestão ácida em triplicata.
Aswood (2017)	Iraque	NPK, SSP, TSP,	Metais (ICP-OES): Ataque ácido em micro-ondas (USEPA 3052). Co e Cr: INAA (sem digestão).	Análise direta por XRF.
Singh et al. (2017)	Noruega	Solo	Solo (total): HNO ₃ conc. em Ultraclave (250°C, 50 bar). Solo (extraível): NH ₄ NO ₃ 0,01 M.	Digestão em alta pressão/temperatura; extração química; incineração + ácidos.
Ahmad & Ansari (2020)	Paquistão	DAP, SSP, NP, MAP, TSP	HNO ₃ :H ₂ O ₂ (2:1), aquecimento a 130°C, evaporação para 3 mL, filtração (Whatman 42), diluição.	Digestão ácida em chapa, análise por GFAAS.
Nunes et al. (2014)	Brasil	SSP, TSP, MAP, NPK	Digestão por micro-ondas com HNO ₃ 65%, repouso noturno, aquecimento programado.	Validação do método LIBS. Resíduos insolúveis filtrados e analisados separadamente.
Elisha & Elisha (2014)	Nigéria	SSP, DAP	Digestão ácida com HNO ₃ concentrado e oxidação com H ₂ O ₂ a 30%.	Digestão prolongada em sistema aberto.
Jayasumana et al. (2015)	Sri Lanka	TSP, NPK.	Digestão ácida em tubo aberto com HCl + HNO ₃ concentrados, aquecimento/ebulição por 4h.	Método padrão da EPA com controle de qualidade.
Javied et al. (2023)	Paquistão	Solo	Leeds Public Analyst Method	Digestão ácida com oxidante
Zhang et al. (2025)	Alemanha	(SSP, TSP, NPK)	Suspensão em solução de NaCl, filtração e análise por ICP-OES/ICP-MS (segundo Bloem et al., 2016; Chouchene et al., 2022)	Método de preparação para análise elementar sem digestão ácida forte.
Chmielewska et al. (2025)	Polônia	(SSP, TSP, NPK)	Mineralização com mistura de ácidos HNO ₃ + HClO ₄	Digestão ácida para análise de metais pesados por espectrometria de absorção atômica (ASA)

Fonte: Elaborada pelo(a) Autor(a)

inorgânicos, enquanto o peróxido de hidrogênio complementa a oxidação, auxiliando na decomposição completa da matriz e na obtenção de soluções límpidas. Este protocolo é particularmente adequado para técnicas analíticas sensíveis que requerem baixo teor de sólidos dissolvidos e matriz relativamente simples, como a Espectrometria de Absorção Atômica com Forno de Grafite (EAAFG).

Em contraste, a digestão ácida assistida por micro-ondas em vasos fechados pressurizados, como aplicada por Saueia et al. (2013) seguindo o método USEPA 3052, representa o estado da arte para a digestão total de matrizes complexas. Este método oferece vantagens decisivas como: Eficiência e rapidez, com o aquecimento interno direto reduzindo o tempo de digestão de horas para minutos a recuperação quantitativa superior, pois as altas temperaturas (até 250°C) e pressões alcançadas no sistema fechado promovem a decomposição completa de fases minerais recalcitrantes, como silicatos presentes nas rochas fosfáticas, a minimização de contaminação e perdas, já que o sistema selado previne a volatilização de elementos e a entrada de contaminantes, a segurança operacional, ao reduzir a exposição do analista aos fumos ácidos e a um menor consumo de ácidos. E, portanto, o método preferencial para análises elementares de alto desempenho por ICP-OES/ICP-MS, garantindo a liberação total dos elementos traço para avaliação de conformidade com limites regulatórios.

Paralelo a isso, abordagens que dispensam a digestão ácida química convencional são igualmente relevantes. A análise direta por Espectrometria de Fluorescência de Raios X (XRF), como realizada por Singh et al. (2017), requer apenas preparação física da amostra (moagem, homogeneização e pelletização). Trata-se de uma técnica rápida, não destrutiva, que não gera resíduos ácidos e é excelente para análise semi-quantitativa e triagem. Sua principal limitação reside na sensibilidade, que pode ser inadequada para elementos traço em baixíssimas concentrações, e na necessidade de curvas de calibração robustas para matrizes tão variáveis como fertilizantes. Outra técnica que não requer digestão é a Análise por Ativação Neutrônica (INAA), utilizada por Saueia et al. (2013) para elementos como Co e Cr. A INAA é uma técnica nuclear de altíssima sensibilidade e praticamente isenta de branco químico, mas sua aplicação é restrita a poucos laboratórios especializados com acesso a um reator nuclear.

Métodos inovadores de preparação menos agressiva também surgem, como o descrito por Zhang et al. (2025), que envolve suspensão da amostra em solução de NaCl e filtração. Este procedimento, baseado em trabalhos anteriores, parece visar a fração solúvel ou rapidamente mobilizável dos elementos, possivelmente para estudos de biodisponibilidade ou lixiviação, em vez do teor total. Representa uma abordagem mais direcionada a questões ambientais específicas, contrastando com os métodos de digestão total.

A (tabela 1), também revela a importância das extrações seletivas e da validação metodológica. O trabalho de Singh et al. (2017) ilustra bem essa dualidade: empregaram tanto uma digestão total com HNO_3 em condições extremas (Ultracleave) para determinar teores totais, quanto uma extração com NH_4NO_3 0,01 M para estimar a fração biodisponível ou mobilizável dos metais. Esta segunda

abordagem é ecologicamente mais significativa, pois avalia a fração que potencialmente entra na solução do solo e está disponível para plantas ou pode ser lixiviada. A menção a métodos padronizados, como o da EPA por Jayasumana et al. (2015) e o Leeds Public Analyst Method por Javied et al. (2023), sublinha a necessidade de protocolos validados e reconhecidos para garantir a comparabilidade e a confiabilidade dos dados em monitoramento ambiental e controle de qualidade.

Um ponto crítico ressaltado por Nunes et al. (2014) é a prática de analisar separadamente os resíduos insolúveis após filtração. Este passo é essencial na validação de qualquer método de digestão, especialmente ao se desenvolver ou adaptar técnicas como a LIBS, para assegurar que nenhum analito de interesse permaneceu retido em fases não dissolvidas, o que levaria a uma subestimação sistemática dos resultados.

Em síntese, a análise da tabela demonstra que não existe um método único e universal para a preparação de fertilizantes fosfatados. A seleção do protocolo ótimo é uma decisão técnica que deve considerar: a natureza da amostra (tipo de fertilizante, presença de matéria orgânica), os elementos a serem determinados e suas propriedades físico-químicas, a técnica analítica final a ser utilizada, os requisitos de sensibilidade e limite de detecção, e os aspectos práticos de custo, tempo, segurança e infraestrutura. A tendência contemporânea, contudo, inclina-se para métodos mais eficientes, controlados e seguros, como a digestão por micro-ondas para análises totais, e para o desenvolvimento de métodos alternativos que reduzam o uso de ácidos fortes, alinhando-se a princípios da química verde. Independentemente da escolha, a validação rigorosa do procedimento, incluindo o uso de materiais de referência certificados com matriz similar, é imperativa para gerar dados analíticos de qualidade, que formam a base para uma regulamentação eficaz e para o uso sustentável de fertilizantes fosfatados na agricultura.

Análise Elementar em Fertilizantes Fosfatados: Uma Síntese Comparativa

A análise dos dados compilados na (Tabela – 2) revela uma heterogeneidade pronunciada nos teores de elementos potencialmente tóxicos entre fertilizantes fosfatados de diferentes origens geográficas e tipos. Essa variação pode ser atribuída primariamente à composição geoquímica singular das jazidas de rocha fosfática utilizadas como matéria-prima, mas também reflete diferenças nos processos industriais de produção e, potencialmente, nos padrões regulatórios locais.

As concentrações de cádmio apresentam ampla variação, desde valores relativamente baixos, como 0.397 mg/kg em SSP alemão de origem ígnea (ZHANG et al., 2025), até teores alarmantes de 38 mg/kg em SSP da Grécia (NIKOLAIDIS et al., 2024).

Tabela 2 – Teores de metais pesados (mg kg^{-1}) em diferentes tipos de fertilizantes fosfatados comercializados em diversos países.

País	Amostra	Cd	Pb	Ni	Cr	Zn	As	Co	Técnica de análise	Referência
Brasil	SSP	1.00	15.0	N/A	2.00	N/A	N/A	N/A	LIBS	NUNES et al., (2014)
Iraque	TSP	N/A	N/A	110	590	540	N/A	N/A	XRF	ASWOOD et al., (2017)
Alemanha	SSP	0.397	6.25	14.6	14.7	58.7	3.33	12.0	ICP-OES e ICP-MS	ZHANG et al., (2025)
Arabia Saudita	TSP	32.2	22.8	69.3	322,6	N/A	N/A	15.5	EAA-FG	EI-TAHER et al., (2012)
Sri Lanka	TSP	2.0	252.5	25.0	29.3	489.8	31.00	6.0	AAS e ICP-MS	JAYASUMANA et al. (2015)
Paquistão	SSP	N/A	27.88	12.26	1.65	51.87	N/A	N/A	FAAS	JAVIED.S et al., (2023)
Paquistão	DAP	6.9	40.1	29.2	18.6	71.4	N/A	N/A	FAAS	JAVIED.S et al (2023)
Grecia	FF	38,0	45,0	60,0	90,0	850,0	12,0	25,0	ICP-OES	NIKOLAIDIS, N. et al (2024)
Alemanha	SSP	7.96	5.78	19.8	87.3	163.9	5.59	1.20	ICP-OES e ICP-MS	ZHANG et al., (2025)
Brasil	TSP	17.8	70.0	83.9	38.0	78.8	<0.9	23.8	INAA e ICP-OES	Saueia, C. et al., (2013)
Polonia	SSP	7.87	5.43	154	154	197	N/A	N/A	(ASA/AAS)	LUKASZEK et al.,(2025)
Nigeria	NPK	10.7	1.00	127.3	N/A	153.9	N/A	N/A	AAS	ELISHA, J. J. et al., (2014)
Brunei	NPK	19.7	40.3	32.5	51.0	259	N/A	19.3	ICP-OES	ZUNAIDI et al., (2021)
Brasil	NPK	19.6	28.8	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	GF-AAS	GUILHERME et al. (2019)
Iraque	SSP	4.0	83.0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	AAS	SALIM et al. (2023)

Fonte: Elaborada pelo(a) Autor(a)

Esta disparidade está diretamente ligada à origem da rocha fosfática. Rochas sedimentares, como as exploradas no Norte da África e no Oriente Médio, fontes comuns para a Europa e partes da Ásia, são notoriamente enriquecidas em Cd (ZHANG et al., 2025). Por outro lado, fertilizantes produzidos a partir de rochas ígneas (ex.: depósitos da Rússia - Kola) apresentam naturalmente teores inferiores de Cd e Urânio (U), conforme demonstrado no estudo alemão. Os elevados teores detectados no Brasil e na Grécia sugerem o uso predominante de fosfato sedimentar importado.

O Chumbo também exhibe flutuações consideráveis. Enquanto amostras da Alemanha e Polônia apresentam níveis abaixo de 6.3 mg/kg, valores extremos de 252.5 mg/kg foram reportados no Sri Lanka (JAYASUMANA et al., 2015). Este último caso pode estar associado a contaminantes durante o processamento industrial ou à utilização de matérias-primas com alto teor geogênico de Pb. A presença de níquel e cromo em níveis elevados, como 154 mg/kg para ambos na Polônia (LUKASZEK et al., 2025) e 322.6 mg/kg de Cr na Arábia Saudita (El-TAHER et al., 2012), reforça a hipótese de contaminação da rocha-fonte, possivelmente por associação com minerais de argila ou fácies geológicas específicas.

O zinco, embora seja um micronutriente essencial, aparece em concentrações potencialmente fitotóxicas em alguns fertilizantes, como 850 mg/kg na Grécia. Já o arsênio foi detectado de forma mais esparsa, com o valor mais expressivo (31 mg/kg) novamente no Sri Lanka. A presença de Cobalto (Co) é geralmente baixa, com exceção de amostras como as do Brasil (23.8 mg/kg) e Grécia (25 mg/kg), que podem refletir a composição do minério original.

Influência do tipo de fertilizante

A comparação entre os tipos de fertilizantes também é elucidativa. O Superfosfato Simples (SSP) e o Superfosfato Triplo (TSP), produzidos por acidulação da rocha fosfática, tendem a concentrar os elementos traço presentes no minério. Isso é evidenciado pelos altos teores de vários metais no TSP grego e no SSP brasileiro. O Fosfato Diamônico (DAP), passando por um processo de purificação mais intenso, geralmente apresenta teores reduzidos, como visto na comparação entre DAP e SSP no Paquistão (JAVIED.S et al., 2023). Os fertilizantes NPK apresentam uma assinatura elementar mais complexa, pois os metais podem ser introduzidos por outras fontes de N, P e K, além do ácido fosfórico, justificando os teores significativos encontrados na Nigéria e Brunei.

Implicações agronômicas e ambientais

A aplicação contínua de fertilizantes com altos teores de metais tóxicos constitui um risco crônico de poluição do solo e de bioacumulação na cadeia alimentar. O Cd e o U (não tabelado, mas amplamente discutido na literatura) são de particular preocupação devido à sua alta mobilidade no ambiente e toxicidade para os rins e ossos. A estimativa de que aproximadamente 707 toneladas de U são anualmente adicionadas aos solos agrícolas europeus via fertilizantes fosfatados (ZHANG et al., 2025). A contribuição dos fertilizantes para o teor de Cd no solo alemão foi estimada em 20.9%, um acréscimo considerável ao background geogênico.

Portanto, a simples substituição de fontes de P, como por exemplo em rochas ígneas por sedimentares pode reduzir drasticamente a carga de metais. A implementação de tecnologias de valorização, como a remoção de U e terras raras

durante a produção de ácido fosfórico, surge como uma solução dupla: mitiga a poluição e gera subprodutos de valor econômico.

Fragmentação Normativa e seus Impactos na Cadeia Agrícola Global

O cenário regulatório que rege a presença de elementos potencialmente tóxicos em fertilizantes fosfatados é marcado por uma profunda assimetria entre nações, refletindo não apenas diferentes estágios de desenvolvimento legislativo, mas também distintas prioridades socioeconômicas e capacidades de monitoramento. Enquanto blocos econômicos como a União Europeia avançaram na criação de marcos específicos – por exemplo, estabelecendo um limite para cádmio (Cd) em fertilizantes solúveis de 60 mg por kg de P_2O_5 , com revisões periódicas previstas –, muitos dos países produtores ou consumidores representados na tabela enfrentam um vazio normativo ou dependem de legislações genéricas e pouco aplicadas (COMISSÃO EUROPEIA, 2019).

Esta disparidade cria um ambiente propício para graves impactos externos. A comercialização de fertilizantes com elevadas cargas contaminantes, como os documentados no Sri Lanka e na Grécia, torna-se viável em mercados com barreiras técnicas mais frágeis. Contudo, os custos ambientais e sociais dessa permissividade não são contidos pelas fronteiras nacionais. Solos agrícolas em regiões com legislação menos rigorosa tornam-se depositários cumulativos de metais como chumbo e arsênio, comprometendo sua fertilidade a longo prazo e a segurança dos alimentos ali produzidos (JAYASUMANA et al., 2015; NIKOLAIDIS et al., 2024).

A consequência direta é uma dupla penalização para os agricultores e para a soberania alimentar dessas regiões. Localmente, há o risco crescente de fitotoxicidade, desequilíbrios nutricionais nas culturas e possível contaminação de mananciais. Globalmente, produtos agrícolas de exportação podem enfrentar barreiras sanitárias cada vez mais estritas de importadores com padrões elevados, prejudicando balanças comerciais e o sustento de comunidades rurais. A harmonização de critérios, portanto, não se trata apenas de uma uniformização técnica, mas de um passo essencial para uma cooperação internacional mais justa e para a proteção de um bem comum global: a integridade dos solos que alimentam a população mundial. A construção de capacidades laboratoriais e a transferência de tecnologia para análise e monitoramento são, assim, componentes inseparáveis de qualquer esforço regulatório verdadeiramente eficaz e equitativo.

CONCLUSÕES

Esta revisão sistemática confirma que os fertilizantes fosfatados representam uma importante fonte de introdução de metais pesados nos sistemas agrícolas, em escala global. As concentrações de elementos como Cd, Pb, As, Cr e Ni variam amplamente, sendo essa variabilidade principalmente determinada pela origem geológica da rocha fosfática, com destaque para depósitos sedimentares, que tendem a apresentar teores mais elevados. Os resultados também evidenciam desafios analíticos relevantes, associados à diversidade de métodos de preparo e análise de amostras, o que dificulta a comparação entre estudos. Embora o teor total de metais seja fundamental para fins regulatórios, ele não reflete, isoladamente, o risco ambiental, que depende da especiação química, da biodisponibilidade e das condições edafoclimáticas locais, ainda pouco exploradas na literatura.

Adicionalmente, a falta de harmonização entre legislações nacionais amplia os riscos ambientais e à segurança alimentar, favorecendo a comercialização de fertilizantes mais contaminados em mercados menos regulados. Assim, a gestão sustentável dos fertilizantes fosfatados requer regulamentos baseados em evidências científicas, padronização analítica, avanço em tecnologias de purificação e programas de monitoramento de longo prazo, de modo a garantir a produtividade agrícola sem comprometer a qualidade ambiental e a saúde pública.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Universidade Federal de Catalão (UFCAT) pelo apoio institucional à realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ASWOOD, Murtadha Shakir. Determination of Heavy Metals in Fertilizer Samples by X-ray Fluorescence Techniques. **Journal of University of Babylon, Pure and Applied Sciences**, v. 25, n. 5, p. 1778-1785, 2017.
- COMISSÃO EUROPEIA. Regulamento (UE) 2019/1009 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 5 de junho de 2019, que estabelece regras relativas à disponibilização no mercado dos produtos fertilizantes com a marcação CE e que altera os Regulamentos (CE) n.º 1069/2009 e (CE) n.º 1107/2009 e revoga o Regulamento (CE) n.º 2003/2003. **Jornal Oficial da União Europeia**, L 170, 25 de junho de 2019.
- ELISHA, Jamok Jacob; ELISHA, Martha Jamok. Characterization of selected inorganic fertilizers by atomic absorption spectroscopy: possible carryover of heavy

- metals from phosphate rock. **International Journal of Science and Research (IJSR)**, v. 3, n. 5, p. 94-96, mai. 2014. Disponível em: <http://www.ijssr.net/archive/v3i5.php?id=20131328>. Acesso em: [08/01/2026].
- EL-TAHER, A.; ALTHOYAIB, S. S. Natural radioactivity levels and heavy metals in chemical and organic fertilizers used in Kingdom of Saudi Arabia. **Applied Radiation and Isotopes**, [S. l.], v. 70, n. 8, p. 290-295, 2012. Acesso em: [08/01/2026].
- GUILHERME, Luiz Roberto Guimarães et al. Metais em fertilizantes inorgânicos: avaliação de risco à saúde após a aplicação. 2. ed. rev. e atual. Lavras: Ed. UFLA, 2015. 210 p.
- HU, J. et al. Evidências da acumulação de metais (e metaloides) tóxicos em solos agrícolas impactados pela aplicação a longo prazo de fertilizantes fosfatados. **Science of the Total Environment**, v. 907, p. 167863, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.167863.
- JAYASUMANA, C. et al. Phosphate fertilizer is a main source of arsenic in areas affected with chronic kidney disease of unknown etiology in Sri Lanka. **SpringerPlus**, [S. l.], v. 4, n. 90, p. 1–8, 2015. Acesso em: [08/01/2026].
- JAVIED, Sabiha et al. Uptake of heavy metal in wheat from application of different phosphorus fertilizers. **Journal of Food Composition and Analysis**, [S. l.], v. 115, n. 104958, p. 1–9, 2023. Acesso em: [08/01/2026].
- JIAO, WENTAO; CHEN, WEIPING; CHANG, ANDREW C.; PAGE, ALBERT L. Environmental risks of trace elements associated with long-term phosphate fertilizers applications: A review. **Environmental Pollution**, [S. l.], v. 168, p. 44–53, 2012. Acesso em: [10/11/2025].
- JOHNSTON, A. E.; POULTON, P. R. Phosphorus in agriculture: a review of results from 175 years of research at Rothamsted, UK. **Journal of Environmental Quality**, v. 48, p. 1133-1144, 2019. DOI: 10.2134/jeq2019.02.0078.
- LUKASZEK-CHMIELEWSKA, Aneta et al. Heavy metals and natural radioactive isotopes in phosphate and compound fertilisers and their impact on human health. **Scientific Reports**, [S. l.], v. 15, n. 33701, p. 1-12, 29 set. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-18945-4>. Acesso em: [10/01/2026].

- MARDAMOOTOO, T.; DU PREEZ, C. C.; BARNARD, J. H. Phosphorus management issues for crop production: A review. **African Journal of Agricultural Research**, v.17, n. 7, p. 939-952, jul. 2021. DOI: 10.5897/AJAR2020.15205. Disponível em: <http://www.academicjournals.org/AJAR>. Acesso em: [10/11/2025].
- MARTOS, Lara M. di; JOST, Cristiane L. Sequential determination of five heavy metal ions in Brazilian phosphate fertilizers and surface waters by stripping voltammetry. **International Journal of Environmental Science and Technology**, [S. l.], v. 16, n. 11, p. 6535–6546, nov. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13762-018-02181-7>. Acesso em: [08/01/2026].
- NIÑO-SAVALA, A. G. et al. Poluição por cádmio proveniente de fósforo. **Fronteiras da Ciência e Engenharia Agrícolas**, v. 6, n. 4, p. 419–430, 2019. DOI: 10.15302/J-FASE-2019273.
- NOLI, Fotini; SIDIRELLI, Maria; TSAMOS, Panagiotis. The impact of phosphate fertilizer factory on the chemical and radiological pollution of the surrounding marine area (seawater and sediments) in northwestern Greece. **Regional Studies in Marine Science**, [S. l.], v. 73, n. 103458, p. 1–8, 2024. Acesso em: [08/01/2026].
- NUNES, Lidiane Cristina; CARVALHO, Gabriel Gustinelli Arantes de; SANTOS JÚNIOR, Dario; KRUG, Francisco José. Determination of Cd, Cr and Pb in phosphate fertilizers by laser-induced breakdown spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part B*, v. 97, p. 42-48, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sab.2014.04.011>. Acesso em: [10/11/2025].
- RAMALHO, J. F. G. P.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; VELLOSO, A. C. X. Acúmulo de metais pesados em solos cultivados com cana-de-açúcar pelo uso contínuo de adubação fosfatada e água de irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 4, p. 971–979, 1999. DOI: 10.1590/S0100-06831999000400024.
- SAUEIA, C. H. R. et al. Distribuição de elementos potencialmente tóxicos no fosfogesso e em fertilizantes fosfatados brasileiros. **E3S Web of Conferences**, Les Ulis, v. 1, art. 04005, 2013. DOI: 10.1051/e3sconf/20130104005.
- SUCIU, Nicoleta Alina et al. Cd content in phosphate fertilizer: Which potential risk for the environment and human health? *Current Opinion in Environmental Science*

& Health, [S. l.], v. 30, p. 1-6, dez. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2022.100392>. Acesso em: [10/11/2025].

ZHANG, Lian-kai et al. Risks and governance of heavy metals in European soil applied phosphate fertilizers. **China Geology**, v. 8, p. 560-572, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.31035/cg.2023147>. Acesso em: [08/01/2026].