

METAIS EM ÁGUAS DE RECARGA DE AQUÍFEROS: MOBILIDADE EM SOLOS AGRÍCOLAS E TÉCNICAS DE MONITORAMENTO

Angélica Konradt Güths¹

Mélory Maria Fernandes de Araujo²

Vanessa Nunes Alves³

Resumo:

A presença de metais em águas de recarga de aquíferos e sua relação com solos agrícolas constitui uma preocupação ambiental relevante, especialmente em regiões sujeitas à exploração intensiva do solo e dos recursos hídricos. A mobilidade de metais em solos agrícolas e águas subterrâneas é influenciada por interações físico-químicas, biológicas e hidrogeológicas, incluindo lixiviação, fluxo preferencial e reações microbianas, que afetam a transferência de contaminantes do solo para os aquíferos. Aspectos como textura e mineralogia do solo, intrusão de água do mar e práticas de manejo agrícola podem alterar a solubilidade e o transporte de metais tóxicos, como cromo, arsênio e cádmio. Este trabalho tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica, utilizando análise bibliométrica por meio da ferramenta Bibliometrix, para mapear tendências, lacunas de pesquisa e técnicas de monitoramento aplicadas à avaliação da qualidade da água subterrânea e à mobilidade de metais em contextos agrícolas. A revisão considerará abordagens da determinação de metais por espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado, espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado e espectrometria de absorção atômica. Os resultados obtidos fornecem subsídios científicos relevantes para o aprimoramento das estratégias de monitoramento ambiental, manejo sustentável do solo e proteção das águas subterrâneas, contribuindo para a mitigação de impactos e para a segurança ambiental em áreas agrícolas.

Palavras-chave: Solos agrícolas; Mobilidade de metais; Contaminação ambiental; ICP-OES; ICP-MS;

* Instituto de Química – UFCAT: angelica-kg1@hotmail.com¹; mmfa.eh@gmail.com²; vanessa.nunes@ufcat.edu.br³

INTRODUÇÃO

A contaminação de solos e águas subterrâneas tem se intensificado nas últimas décadas em função de atividades antrópicas, com destaque para as práticas agrícolas, que frequentemente envolvem o uso de fertilizantes, corretivos e defensivos agrícolas contendo metais potencialmente tóxicos. Em áreas agrícolas situadas sobre zonas de recarga de aquíferos, esses elementos assumem especial relevância ambiental, uma vez que sua mobilidade no solo pode resultar na contaminação das águas subterrâneas, comprometendo a qualidade desse recurso estratégico.

O comportamento dos metais no solo é governado por uma complexa interação entre processos físico-químicos que controlam sua retenção, transformação e transporte ao longo do perfil. Mecanismos como adsorção às superfícies de argilominerais e óxidos de ferro e manganês, complexação com a matéria orgânica do solo e precipitação/dissolução de fases minerais exercem papel central na definição da mobilidade desses elementos.

A intensidade desses processos é fortemente condicionada por atributos do solo, como pH, capacidade de troca catiônica, teor e qualidade da matéria orgânica, mineralogia da fração argila.

O pH do solo, em particular, constitui um dos principais fatores de controle da mobilidade dos metais, sendo que em ambientes mais ácidos, a diminuição da adsorção eletrostática e a maior solubilidade de diversas espécies metálicas tendem a favorecer sua mobilidade. Por outro lado, a matéria orgânica pode atuar de forma dual, promovendo a imobilização por meio da formação de complexos estáveis ou, alternativamente, aumentando a mobilidade quando associada à formação de complexos solúveis de baixo peso molecular.

Quando a capacidade de retenção do solo é excedida, seja por aporte contínuo de metais ou por alterações nas condições geoquímicas do sistema, esses elementos podem ser transportados verticalmente, atingindo o lençol freático. Em áreas de recarga de aquíferos, esse processo é particularmente crítico, uma vez que a infiltração favorecida e a elevada conectividade hidráulica aumentam o potencial de transferência dos metais para o sistema aquífero, onde o transporte ocorre de forma mais eficiente e em escalas espaciais ampliadas.

No contexto do monitoramento de metais em solos agrícolas e águas associadas à recarga de aquíferos, diferentes técnicas analíticas e abordagens geoquímicas têm sido amplamente empregadas para a determinação das concentrações totais e da forma de associação desses elementos no ambiente. A espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) é uma das técnicas mais utilizadas para a quantificação multielementar de metais em amostras de solo e água. Seu princípio baseia-se na excitação dos átomos e íons em um plasma de alta temperatura, com posterior emissão de radiação em comprimentos de onda característicos de cada elemento.

Já a espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS) destaca-se pela elevada sensibilidade e baixos limites de detecção, permitindo a quantificação de metais e metaloides em concentrações traço e ultra-traço. Essa técnica é particularmente relevante em estudos de águas de recarga e águas subterrâneas, onde os teores de metais tendem a ser baixos, mas ambientalmente significativos. Além disso, o ICP-MS possibilita análises isotópicas, ampliando o potencial de aplicação em estudos de origem, transporte e processos geoquímicos associados aos metais no sistema solo-água.

Dessa forma, a integração entre técnicas analíticas de alta precisão, permite uma avaliação mais abrangente do comportamento dos metais em solos agrícolas e águas de recarga de aquíferos, contribuindo para o aprimoramento das estratégias de manejo e conservação do solo e da água. Diante da complexidade dos processos que controlam a mobilidade de metais em solos agrícolas e do crescente risco de contaminação das águas subterrâneas, especialmente em áreas de recarga de aquíferos, torna-se essencial compreender como a produção científica tem abordado essa temática.

Portanto, este trabalho tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica da produção científica dos últimos dez anos, utilizando análise bibliométrica por meio da ferramenta *Bibliometrix*, com o intuito de mapear tendências de pesquisa, identificar lacunas científicas e sintetizar as principais técnicas de monitoramento aplicadas à avaliação da qualidade da água subterrânea e à mobilidade de metais em solos agrícolas.

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo adotou uma abordagem bibliométrica, para analisar a produção sobre técnicas de monitoramento de metais tóxicos em águas subterrâneas e solos agrícolas. A análise bibliométrica é um método que integra análises quantitativas e qualitativas da literatura científica, analisando tendências de pesquisa com base em bases de dados científicas, possibilitando identificar padrões, redes de colaboração e o impacto das publicações (Donthu et al., 2021).

Para a execução das análises bibliométricas, empregou-se o pacote Bibliometrix do software R, aliado à interface gráfica *Biblioshiny*, conforme descrito por Aria e Cuccurullo (2017). O fluxo de análise envolveu importação, padronização, limpeza dos metadados e fusão das bases. Esse programa é amplamente utilizado e reconhecido na literatura para análise de dados bibliométricos.

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos a partir das bases Web of Science (WoS) e Scopus, por serem amplamente reconhecidas pela abrangência e qualidade de indexação de periódicos revisados por pares. A busca foi realizada considerando os periódicos revisados por pares. As palavras chaves, e descritores escolhidos para fazer a busca foram ("ICP-OES" OR "ICP-MS") AND ("soil" OR "water") AND ("agricultural soil" OR "groundwater" OR "aquifer recharge"). O acesso às bases foi obtido gratuitamente via plataforma CAFE (Comunidade Acadêmica Federada), utilizando credenciais institucionais. As buscas foram realizadas em 15 de dezembro de 2025, considerando os registros disponíveis até essa data.

A busca foi realizada considerando o período compreendido entre 2015 e 2025, de modo a contemplar a evolução das pesquisas nos últimos anos. Os filtros utilizados na busca foram, somente artigos produzidos no Brasil em língua portuguesa e inglesa. A busca na *Scopus* retornou 44 documentos (exportados em CSV) e a *Web of Science* retornou 44 documentos (exportados em TXT). Foram removidos 30 artigos que estavam duplicados nas bases de dados.

RESULTADOS

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- Metais tóxicos em solos agrícolas

Cobbina e colaboradores (2015), definem metais pesados como um grupo de compostos químicos ubíquos e não-biodegradáveis, sendo que o solo tem grande capacidade de retenção desses elementos. Atualmente a IUPAC (União Internacional de Química Pura e Aplicada) recomenda não usar mais o termo “metal pesado” porque ele é cientificamente impreciso e ambíguo, principalmente porque densidade e toxicidade são conceitos diferentes. Por exemplo o ferro e zinco que apresentam alta densidade, mas são essenciais para diversos organismos.

Íons de metais tóxicos ocorrem como constituintes de minerais primários das rochas, sejam elas de origem ígneas, metamórficas ou sedimentares, por isso esses elementos são tidos como excelentes indicadores da variabilidade natural na composição dos solos, devido ao fato dos teores naturais desses elementos no solo estarem, diretamente, relacionados à sua matriz mineralógica (HUISMAN et al., 1997; RICHARD et al., 1999; BLASER et al., 2000; BACON E HUDSON, 2001). Deste modo, os metais tóxicos presentes nos solos podem ser divididos quanto à sua origem, em metais litogênicos, ou liberados pelo intemperismo e metais antropogênicos, quando são adicionados ao solo pela atividade humana, como mineração, aplicação de defensivos agrícolas e fertilizantes (ALLOWAY, 1995; CAMARGO et al., 2001; KABATA-PENDIAS e PENDIAS, 2001; TAVARES, 2013).

Eles podem ser encontrados nos solos das seguintes formas: na solução do solo; adsorvidos eletrostaticamente aos sítios de troca; adsorvidos especificamente na superfície das partículas inorgânicas coloidais, oclusos através da coprecipitação dos óxidos, oxiidróxidos e hidróxidos de Al, Fe e Mn e precipitados e complexados pelas substâncias húmicas da matéria orgânica (LAKE et al., 1984; ALLOWAY, 1995; COSTA et al., 2005; MARTINS et al., 2011; GUIMARÃES, 2020). Segundo Martins et al. (2011) o solo tem, um papel depurador de metais tóxicos, imobilizando grande parte desses metais, a depender das propriedades químicas do solo e natureza dos metais.

A liberação de metais tóxicos no solo, pode prejudicar a saúde humana, além de alterar a composição da comunidade microbiana (LI et al., 2017; MINGOTE et al., 2016; TIAN et al., 2017). O comportamento desses elementos no solo é influenciado por fatores como pH, teor de matéria orgânica e presença de outros íons. Dentre as principais propriedades (fatores) que se pode mencionar, tem-se: a mineralogia (originada do material de origem), a textura, teores de argila, o pH, a capacidade de troca catiônica, o conteúdo de matéria orgânica, os teores na fração argila de óxidos,

oxiidróxidos e hidróxidos de Fe, Al e Mn e a interação com outros elementos na solução do solo (FERREIRA et al., 2018). O tipo de solo e as diversas propriedades que este solo apresenta, irão afetar a forma química na qual o metal se encontra, e por sua vez, a disponibilidade e mobilidade desses elementos no solo (GUIMARÃES, 2020). Solos ácidos tendem a aumentar a mobilidade de íons metálicos, elevando o risco de contaminação das águas e a biodisponibilidade para as plantas (MARTINS, 2024).

O aumento nas concentrações de metais potencialmente tóxicos no solo em decorrência do uso de agrotóxicos tem sido observado em diferentes regiões, sendo que, no Brasil, verificou-se um aumento contínuo nas concentrações de Cu e Zn, bem como em seus fatores de enriquecimento, em áreas de produção de uvas submetidas ao uso intensivo de agroquímicos (PRESTON et al., 2016). Atualmente, o setor agrícola enfrenta desafios relacionados ao uso de fertilizantes, corretivos e resíduos orgânicos urbanos contaminados por metais potencialmente tóxicos, provenientes das atividades humanas e do desenvolvimento industrial, que podem comprometer a produtividade, a segurança alimentar e a saúde de plantas e animais (LUCENA et al., 2025).

- Metais tóxicos em águas subterrâneas

A contaminação por metais tóxicos em águas subterrâneas é reconhecida como um problema ambiental e de saúde pública global, devido à persistência, toxicidade e capacidade de bioacumulação desses elementos nos ecossistemas e na cadeia alimentar (UMEH et al., 2025; WONG et al., 2024; ISMANTO et al. 2022). Especialmente em regiões que dependem fortemente de aquíferos para abastecimento humano, agrícola e industrial (ZHANG et al., 2023).

As fontes de contaminação por metais em ambientes aquáticos podem ser classificadas como geogênicas, associadas ao intemperismo e à dissolução de rochas e minerais sob determinadas condições geoquímicas, ou antrópicas, resultantes de atividades humanas. Entre estas, destacam-se a mineração, os processos industriais, o descarte inadequado de resíduos urbanos e industriais, bem como o uso intensivo de fertilizantes e pesticidas na agricultura (WONG et al., 2024; CHAUDHARI et al.; PUNIA et al., 2021).

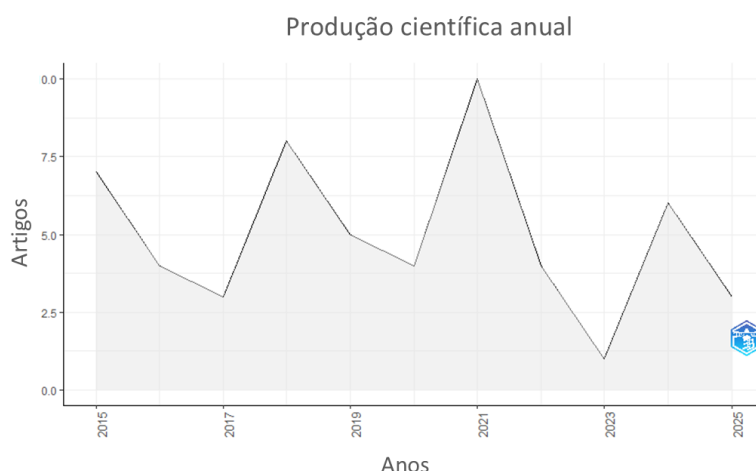
Processos como chuva intensa, flutuações do nível freático e pH ácido do solo aumentam a lixiviação de metais para as zonas saturadas (WONG et al., 2024; UMEH

et al., 2025). Fatores físicos (heterogeneidade geológica, fraturas, falhas), geoquímicos (pH, Eh, complexação, sorção) e a presença de outros contaminantes controlam mobilidade, especiação e biodisponibilidade dos metais (KAYASTHA et al., 2022; UMEH et al., 2025). Metais como As, Pb, Cd, Cr, Hg, Ni, Cu, Zn, Mn e Fe figuram entre os elementos mais frequentemente reportados em águas superficiais e aquíferos contaminados, em função de sua ampla distribuição ambiental, persistência e potencial toxicidade (MOTTA et al., 2025; ZHANG et al., 2023; XU et al., 2024).

REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

A partir da revisão bibliométrica realizada, foi possível identificar e analisar os principais padrões da produção científica relacionada ao tema no período de 2015 a 2025. Os resultados obtidos permitem compreender a evolução temporal das publicações, fornecendo subsídios para a interpretação do estágio de desenvolvimento científico do campo de estudo. A Figura 1 apresenta a produção científica anual ao longo do período analisado, evidenciando um comportamento oscilatório, com tendência geral de decréscimo, conforme indicado pela taxa anual de crescimento negativa (-8,12%).

Figura 1. Produção científica anual de artigos publicados no período de 2015 a 2025 sobre o tema deste estudo



Fonte: elaborado pelos(as) autores(as)

Observou-se uma produção moderada em 2015, com 7 artigos, seguida de redução em 2016 e 2017. Já em 2018 há uma crescente novamente com 8 publicações, entretanto, novamente ocorre uma retração em 2019 (5 artigos) e 2020 (4 artigos) indicando que esse crescimento não se sustentou de forma contínua. O pico de produção foi em 2021, com 10 artigos, refletindo um momento de maior maturidade científica da área, no qual se observa a consolidação de métodos e a intensificação de aplicações em diferentes contextos.

A partir de 2022, ocorre uma queda acentuada da produção, com destaque para 2023 com somente uma publicação, evidenciando uma lacuna recente na literatura, indicando a necessidade de novas abordagens metodológicas, integração de técnicas emergentes e ampliação das aplicações em cenários ainda pouco explorados. A recuperação parcial em 2024 com 6 artigos, sugere um possível movimento de retomada, enquanto uma redução é observada em 2025 com 3 artigos. De modo geral, esses resultados reforçam que, embora o tema apresente relevância consolidada, há espaço para inovação metodológica e aprofundamento das análises.

Também foi possível realizar uma análise dos periódicos que concentram o maior número de publicações relacionadas ao tema. Aqui destacamos os 5 principais, o periódico que mais teve publicações nessa temática foi o *Environmental Monitoring and Assessment*, com 4 artigos, configurando-se como a principal fonte de disseminação científica, o que indica a forte associação do tema com estratégias de monitoramento ambiental e avaliação da qualidade de sistemas naturais. Seguido dos periódicos *Chemosphere* e *Environmental Pollution*, com 3 artigos cada, reforçando o caráter interdisciplinar e aplicado da temática, especialmente no que se refere à avaliação da contaminação ambiental, à dinâmica e mobilidade de metais e aos impactos em sistemas hídricos e de solo.

A presença dessas fontes sugere que os estudos têm forte viés voltado à química ambiental, à toxicologia e à poluição difusa. Já os periódicos *Engenharia Sanitária e Ambiental* e *Environmental Science and Pollution Research*, ambos com 2 artigos, indicam a relevância do tema no contexto da engenharia ambiental e sanitária, bem como na formulação de estratégias de gestão e mitigação de impactos ambientais, especialmente em ambientes influenciados por atividades agrícolas. De forma geral, a distribuição das publicações entre diferentes periódicos evidencia que,

A recorrência dos termos “*soil*”, “*agricultural soils*” e “contamination” reforça a centralidade dos ambientes agrícolas como áreas de investigação prioritária. Ao destacar termos como “*agricultural soils*”, “*heavy-metals*”, “*soil*” e “*accumulation*”, sugere que a literatura enfatiza não apenas a presença de contaminantes, mas também os processos de acúmulo e bioacumulação no sistema solo-água. A recorrência de “*environmental monitoring*”, “*pollution*”, “*quality*” e “*water*” evidencia a forte relação entre os estudos e a avaliação da qualidade ambiental, especialmente em contextos agrícolas.

9

No que se refere às técnicas analíticas, observa-se a predominância de métodos instrumentais consagrados, como ICP-MS, ICP-OES e espectrometria de absorção atômica, frequentemente associados a termos como *“preconcentration”* e “”, indicando a busca por alta sensibilidade analítica na determinação de metais e elementos-traço em matrizes ambientais complexas. Além disso, a presença de palavras-chave relacionadas a matrizes ambientais específicas, como *“sediments”*, *“river”*, *“water”*, *“drinking water”*, *“vegetables”* e *“rice”*, evidencia a diversidade de ambientes e sistemas agrícolas investigados, bem como a preocupação com a transferência de contaminantes ao longo da cadeia solo-água-planta. Elementos específicos, como cádmio, chumbo, mercúrio, cobre, níquel e alumínio, também aparecem de forma recorrente, indicando que esses metais constituem os principais focos de investigação devido à sua toxicidade e relevância ambiental.

A tabela 1 apresenta os principais artigos, com maior número de citações indexado, sobre as técnicas de monitoramento, baseadas em plasma indutivamente acoplado (ICP-OES e ICP-MS) de metais em águas subterrâneas e solos agrícolas, em contextos geoambientais do Brasil.

Tabela 1: Principais artigos utilizando as técnicas de monitoramento

Autor	Ano	Metodologia	Técnica	Resultados
Quinones et al	2015	O estudo foi realizado na região oeste do estado do Paraná, Brasil, especificamente em águas subterrâneas do Aquífero Serra Geral, abrangendo a região rural do município de Toledo. As amostras de água subterrânea foram coletadas de 10 poços localizados nessa área	ICP-OES	Analizados e avaliados B, Mg, Na
Sahoo et al	2019	Realizado na bacia do rio Itacaiúnas, sudeste da Amazônia, Brasil. Total de 1429 amostras em 900 pontos de amostragem	ICP-MS	Ni, Cr, V, Cu, Fe, Mn,
Gredilla et al	2019	Realizada em áreas agrícolas próximas a usina termoeletrica, foram	ICP-MS	Hg

		coletadas 47 amostras de solo.		
Da Silva et al	2016	Realizada em Pernambuco, em 60 áreas de plantação de cana de açúcar.	ICP-OES	Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn
Bispo et al 201	2021	O estudo avaliou os elementos terras raras nos biomas brasileiros e seus diferentes solos.	ICP-OES/ICP-MS	La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu
Rosolen et al	2015	O estudo avaliou a contaminação de solos de áreas úmidas e sedimentos de planícies de inundação associada a atividades agrícolas no bioma Cerrado, em Minas Gerais.	ICP-OES	As, Ba, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Sr, Ti, V, Zn, Zr
Silva et al	2015	O estudo realizou uma avaliação em a bacia hidrográfica do rio Ipojuca, que se estende da região semiárida ocidental até o litoral do estado de Pernambuco, com o objetivo de determinar as concentrações metais pesados em solos.	ICP-OES/ICP-MS	Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn, As, Hg
Francisco et al	2019	O estudo avaliou a ocorrência de metais e contaminantes emergentes em águas subterrâneas e os potenciais riscos à saúde humana, nos aquíferos Itaporã e Guarani.	ICP-OES	Fe, Mn, Cr, Al, Cu, Zn, Ni, Cd, Co

Os artigos analisados correspondem aos trabalhos mais citados identificados na análise bibliométrica, o que reforça sua relevância científica e influência no avanço do conhecimento sobre contaminação, mobilidade e comportamento geoquímico de metais em ambientes agrícolas e águas subterrâneas. Nos estudos voltados à qualidade das águas subterrâneas, como os de Quinones et al. (2015) e Francisco et al. (2019), a utilização do ICP-OES mostrou-se adequada para a determinação de elementos maiores e traço em concentrações relativamente mais elevadas, como B, Mg, Na, Fe e Mn. Esses trabalhos destacam a influência das características

hidrogeoquímicas naturais dos aquíferos, bem como de atividades antrópicas associadas ao uso agrícola e à ocupação do solo, na composição química das águas.

Por outro lado, pesquisas que demandaram maior sensibilidade analítica e a detecção de elementos em níveis ultra-traço, como Hg e determinados metais potencialmente tóxicos, empregaram o ICP-MS, conforme observado nos estudos de Sahoo et al. (2019) e Gredilla et al. (2019). No caso da bacia do rio Itacaiúnas, a aplicação do ICP-MS permitiu identificar padrões espaciais e sazonais de metais como Ni, Cr, V, Cu, Fe e Mn, associados principalmente a controles geogênicos e hidrogeoquímicos, enquanto no estudo em solos agrícolas próximos a uma usina termelétrica foi possível avaliar o comportamento e a retenção do Hg no solo.

Os estudos realizados em solos agrícolas e sedimentos, como os de Da Silva et al. (2016), Rosolen et al. (2015) e Silva et al. (2015), evidenciam a relevância do ICP-OES para análises multielementares em matrizes sólidas, permitindo a avaliação simultânea de macroelementos e metais potencialmente tóxicos. Esses trabalhos demonstram que a distribuição dos metais está fortemente condicionada pelo material de origem, pelos processos pedogenéticos e pela dinâmica hidrológica, com destaque para ambientes de planície de inundação, que atuam como zonas de acumulação de contaminantes.

O estudo de Bispo et al. (2021) amplia essa abordagem ao avaliar elementos terras raras (ETRs) em diferentes solos e biomas brasileiros, utilizando de forma complementar ICP-OES e ICP-MS. Essa estratégia analítica combinada permitiu caracterizar padrões geoquímicos naturais e reforçar o papel dos ETRs como indicadores do material de origem e do grau de intemperismo, além de contribuir para a definição de valores de fundo geoquímico em solos tropicais.

Os estudos analisados, reconhecidos como referências na área, demonstram que as técnicas ICP-OES e ICP-MS são metodologias consolidadas e amplamente empregadas na avaliação de metais em solos agrícolas e águas subterrâneas, apresentando elevada eficiência e confiabilidade em análises multielementares. Esses métodos possibilitam interpretações robustas dos processos geoquímicos, contribuindo para a avaliação de riscos ambientais, o monitoramento da qualidade do solo e da água e o desenvolvimento de estratégias de manejo sustentável do solo e da água. Assim, a associação entre métodos consolidados e estudos de alta

relevância bibliométrica reforça o papel central das técnicas ICP em pesquisas ambientais contemporâneas.

CONCLUSÕES

A presente revisão bibliométrica, fundamentada em princípios da Química Ambiental, permitiu compreender de forma integrada o estado da arte sobre a mobilidade de metais potencialmente tóxicos em solos agrícolas e águas de recarga de aquíferos, bem como as principais técnicas analíticas empregadas no monitoramento desses elementos no contexto brasileiro entre 2015 e 2025. Os resultados evidenciam que, embora a produção científica apresente oscilações temporais e uma tendência recente de redução, o tema permanece ambientalmente relevante, especialmente em áreas agrícolas sobre zonas de recarga aquífera.

O ICP-OES mostrou-se amplamente aplicado em estudos de solos agrícolas e águas subterrâneas com concentrações moderadas de metais, enquanto o ICP-MS destacou-se pela elevada sensibilidade, sendo essencial para a detecção de elementos em níveis traço e ultra-traço, como Hg, Cd e elementos terras raras, além de permitir interpretações mais robustas sobre origem e transporte geoquímico. Os resultados bibliométricos também indicam que os metais mais investigados são: Cu, Zn, Cd, Pb, Cr, Ni e Hg. Os quais refletem tanto a influência do material de origem quanto a contribuição antrópica associada às práticas agrícolas e industriais.

De modo geral, esta revisão evidencia que a Química Ambiental desempenha papel central na compreensão da mobilidade, biodisponibilidade e risco ambiental dos metais em sistemas agrícolas, destacando a necessidade de abordagens integradas que combinem análises químicas avançadas. Assim, os resultados obtidos fornecem subsídios científicos relevantes para o aprimoramento das estratégias de monitoramento ambiental, manejo sustentável do solo e proteção das águas subterrâneas, contribuindo para a mitigação de impactos e para a segurança ambiental em áreas agrícolas.

REFERÊNCIAS

- ARIA, M., & CUCCURULLO, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of informetrics**, 11(4), 959-975.
<https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- BACON, J. R.; HUDSON, G. A flexible methodology for the characterisation of soils: a case study of the heavy metal status of a site at Dornach. **Science of the total environment**, v. 264, p. 153-162, 2001.
- BISPO, F. H. A., DE MENEZES, M. D., FONTANA, A., DE SOUZA SARKIS, J. E., GONÇALVES, C. M., DE CARVALHO, T. S. & GUILHERME, L. R. G. (2021). Rare earth elements (REEs): geochemical patterns and contamination aspects in Brazilian benchmark soils. **Environmental Pollution**, 289, 117972.
- BLASER, P.; ZIMMERMANN, S.; LUSTER, J.; SHOTYK, W. Critical examination of trace element enrichments and depletions in soils: As, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn in Swiss forest soils. **Science of the Total Environment**, v. 249, p. 257-280, 2000.
- CAMARGO, O. A. de. Micronutrientes no solo. IN: REUNIAO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 17. Londrina, 1988. Anais. Londrina: EMBRAPA-CNPSo / IAPAR / SBSCS, 1988. p.103-117.
- CHAUDHARI, M., CHOTALIYA, R., ALI, G., PANDYA, A., & SHRIVASTAV, P. (2024). Assessment of heavy metal contamination in the groundwater of Gujarat, India using the heavy metal pollution index. **Environmental Research and Technology**. <https://doi.org/10.35208/ert.1433696>.
- COBBINA, S.J., CHEN, Y., ZHOU, Z., WU, X., ZHAO, T., ZHANG, Z., FENG, W., WANG, W., LI, Q., WU, X. & YANG, L. Toxicity assessment due to sub-chronic exposure to individual and mixtures of four toxic heavy metals. **Journal of Hazardous Materials**. v. 294, p. 109-120, 2015.
- COSTA, C. N. **Biodisponibilidade de metais pesados em solos do Rio Grande do Sul**. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 110 p. 2005.
- DA SILVA, F. B. V., DO NASCIMENTO, C. W. A., ARAÚJO, P. R. M., DA SILVA, L. H. V., & DA SILVA, R. F. (2016). Assessing heavy metal sources in sugarcane Brazilian soils: an approach using multivariate analysis. **Environmental monitoring and assessment**, 188(8), 457.
- DONTHU, N., KUMAR, S., MUKHERJEE, D., PANDEY, N., & LIM, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. **Journal of business research**, 133, 285-296. <https://doi.org/10.1016/J.JBUSRES.2021.04.070>

- ESPINOZA-QUIÑONES, F. R., MÓDENES, A. N., DE PAULI, A. R., & PALÁCIO, S. M. (2015). Analysis of trace elements in groundwater using ICP-OES and TXRF techniques and its compliance with Brazilian protection standards. **Water, Air, & Soil Pollution**, 226(3), 32.
- FERREIRA, E. P.; COELHO, R. M.; VALLADARES, G. S.; DIAS, L. M. S.; ASSIS, A. C. C.; SILVA, R. C.; AZEVEDO, A. C.; ABREU, C. A. Mineralogy and Concentration of Potentially Toxic Elements in Soils of the São Francisco Sedimentary Basin. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, 2018.
- FRANCISCO, L. F. V., DO AMARAL CRISPIM, B., SPÓSITO, J. C. V., SOLÓRZANO, J. C. J., MARAN, N. H., KUMMROW, F. & BARUFATTI, A. (2019). Metals and emerging contaminants in groundwater and human health risk assessment. **Environmental science and pollution research**, 26(24), 24581-24594.
- GREDILLA, A., DE VALLEJUELO, S. F. O., RODRIGUEZ-IRURETAGOIANA, A., GOMEZ, L., OLIVEIRA, M. L., ARANA, G., ... & SILVA, L. F. (2019). Evidence of mercury sequestration by carbon nanotubes and nanominerals present in agricultural soils from a coal fired power plant exhaust. **Journal of hazardous materials**, 378, 120747.
- GUIMARÃES, L. D. D. **Análise da contaminação por metais pesados e da fertilidade em solos de agroecossistema de montanha, Região Serrana – RJ**. 2020. Tese (Doutorado no Instituto De Agronomia Programa De Pós-graduação Em Agronomia Ciência Do Solo) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2020.
- HUISMAN, D. J.; VERMEULEN, F. J. H.; BAKER, J.; VELDKAMP, A.; KROONENBERG, S. B.; KLAVER, G. Th. A geological interpretation of heavy metal concentrations in soils and sediments in the southern Netherlands. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 59, p. 163-174, 1997.
- ISMANTO, A., HADIBARATA, T., WIDADA, S., INDRAWANTI, E., ISMUNARTI, D., SAFINATUNNAJAH, N., KUSUMASTUTI, W., DWININGSIH, Y., & ALKAHTANI, J. (2022). Groundwater contamination status in Malaysia: level of heavy metal, source, health impact, and remediation technologies. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, 46, 467-482. <https://doi.org/10.1007/s00449-022-02826-5>
- KABATA-PENDIAS, A., PENDIAS, H., Trace elements in soils and plants, 3. ed. Boca Raton, CRC Press, 2001. 431 p.
- LAKE, D. L.; KIRK, P. W. W.; LESTER, J. N. Fractionation, characterization, and speciation of heavy metals in sewage sludge and sludge-amended soils: a review 1. **Journal of Environmental Quality**, v. 13, p. 175-183, 1984.
- LI, B.; BAO, Y.; XU, Y.; XIE, S.; HUANG, J. Vertical distribution of microbial communities in soils contaminated by chromium and perfluoroalkyl substances. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 599, p.156-164, 2017.

- LLOWAY, B. J. The origins of heavy metals in soil. In: ALLOWAY, B.J. (org.). Heavy metals in soils. New York: John Wiley, p. 29-39, 1995.
- MARTINS, C. A.; NOGUEIRA, N. O.; RIBEIRO, P. H.; RIGO, M. M.; DE OLIVEIRA CANDIDO, A. A dinâmica de metais-traço no solo. **Revista brasileira de agrociência**, v. 17, p. 383-391, 2011.
- MARTINS, T. S. **Impactos químicos, biológicos e ecológicos de agrotóxicos e metais pesados em solos da serra da Ibiapaba, Ceará**. 2024. 104 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.
- MINGOTI, R.; SPADOTTO, C. A.; MORAES, D. A. Suscetibilidade à contaminação da água subterrânea em função de propriedades dos solos no Cerrado brasileiro. **Pesquisa agropecuária brasileira**, [s. l.], v. 51, p. 1252-1260, 2016.
- MOTTA, A., MOTTA, N., DA SILVA SALES, D., SALES, C., NUNES, C., & DA SILVA VIANA, R. (2025). Heavy Metal Water Contamination: Anthropogenic Sources and Environmental and Public Health Implications. **Revista de Gestão Social e Ambiental**. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n5-069>.
- PUNIA, A., SINGH, S., & BHARTI, R. (2021). Source, Assessment, and Remediation of Metals in Groundwater. **Groundwater Geochemistry**. <https://doi.org/10.1002/9781119709732.ch5>.
- RICHARD, B.; MAJA, L. B.; INGEMAR, R.; OVE, E.; HARALD, G. Natural lead concentrations in pristine boreal forest soils and past pollution trends: a reference for critical load models. **Environmental science & technology**, v. 33, p. 3362-3367, 1999.
- ROSOLEN, V., DE-CAMPOS, A. B., GOVONE, J. S., & ROCHA, C. (2015). Contamination of wetland soils and floodplain sediments from agricultural activities in the Cerrado Biome (State of Minas Gerais, Brazil). **Catena**, 128, 203-210.
- SAHOO, P. K., DALL'AGNOL, R., SALOMÃO, G. N., JUNIOR, J. D. S. F., SILVA, M. S., E SOUZA FILHO, P. W. M., ... & SIQUEIRA, J. O. (2019). High resolution hydrogeochemical survey and estimation of baseline concentrations of trace elements in surface water of the Itacaiúnas River Basin, southeastern Amazonia: Implication for environmental studies. **Journal of Geochemical Exploration**, 205, 106321.
- SILVA, Y. J. A. B., DO NASCIMENTO, C. W. A., CANTALICE, J. R. B., DA SILVA, Y. J. A. B., & CRUZ, C. M. C. A. (2015). Watershed-scale assessment of background concentrations and guidance values for heavy metals in soils from a semiarid and coastal zone of Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, 187(9), 558.
- TAVARES, S. R. L. **Remediação de solos e águas contaminadas por metais pesados: conceitos básicos e fundamentos**. 1ª edição. Rio de Janeiro, RJ, 2013. 147p.

TIAN, K.; HUANG, B.; XING, Z.; HU, W. Geochemical baseline establishment and ecological risk evaluation of heavy metals in greenhouse soils from Dongtai, China.

Ecological Indicators, [s. l.], v. 72, p. 5103520, 2017.

UMEH, O., IBO, E., EKE, C., AFEKU-AMENYO, H., & OPHORI, D. (2025). A review of the sidelined pollutant: Reviving the fight against heavy metal contamination in an era of emerging contaminants. **Toxicology Reports**, 15.

<https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2025.102073>.

WONG, W., EMRE, M., & TALUKDAR, G. (2024). Groundwater Contamination by Heavy Metals in Malaysia: Sources, Transport, and Remediation Strategies. **Tropical Environment, Biology, and Technology**. <https://doi.org/10.53623/tebt.v2i2.492>.

ZHANG, P., YANG, M., LAN, J., HUANG, Y., ZHANG, J., HUANG, S., YANG, Y., & RU, J. (2023). Water Quality Degradation Due to Heavy Metal Contamination: Health Impacts and Eco-Friendly Approaches for Heavy Metal Remediation. **Toxics**, 11.

<https://doi.org/10.3390/toxics11100828>.