

Prospecção de Tecnologias Usada na Detecção de Metais e Metaloides em Águas Subterrâneas

Prospecting for Technologies Used in the Detection of Metals and Metalloids in Groundwater

Walace Daniel de Almeida Santos¹, Thalita Valesca Santana Freitas Oliveira¹, Ivanice Ferreira dos Santos¹,
Humbervânia R. Gonçalves da Silva¹

¹Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, BA, Brasil

Resumo

As águas subterrâneas são uma fonte essencial de água doce para irrigação, abastecimento e outros usos. A escassez hídrica afeta cerca de 4 bilhões de pessoas no mundo, aumentando a necessidade de métodos práticos para identificar e tratar contaminantes. Este trabalho tem como objetivo fazer mapeamento sobre técnicas de detecção e remediação de contaminantes presentes em águas subterrâneas. O estudo mostra o posicionamento da tecnologia no mercado e suas possíveis melhorias para otimização e redução de custos. Foram analisados 105 documentos de patentes (Espacenet) e 91 artigos (Scopus), utilizando combinações de palavras-chave e códigos IPC. Observou-se um crescente interesse em soluções voltadas para a preservação da qualidade da água. Os resultados mostram a predominância da China (56 patentes) e dos Estados Unidos (18 patentes) na produção tecnológica sobre monitoramento de aquíferos. Os documentos reforçam a importância de investimento em inovação ambiental e apresentam uma visão estratégica do desenvolvimento de tecnologias sustentáveis.

Palavras-chave: Águas Subterrâneas; Metais; Remediação.

Área Tecnológica: Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente.

Abstract

Groundwater is an essential source of fresh water for irrigation, supply and other uses. Water scarcity affects 4 billion people worldwide, increasing the need for technological methods to identify and treat contaminants. This study aims to map techniques for detecting and remediating contaminants in groundwater. The study shows the positioning of the technology in the market and its possible improvements for optimisation and cost reduction. A total of 105 patent documents (Espacenet) and 91 articles (Scopus) were analysed, using combinations of keywords and IPC codes. There was a growing interest in solutions aimed at preserving water quality. The results show the predominance of China (56 patents) and the United States (18 patents) in technological production related to aquifer monitoring. The documents reinforce the importance of investment in environmental innovation and technology a strategic vision for the development of sustainable technologies.

Keywords: Groundwater; Metals; Remediation.

1 Introdução

A água é um elemento essencial e se destaca entre os recursos naturais, sendo fundamental para a manutenção da vida de todos os seres vivos (Leite, 2021). As águas subterrâneas são reservatórios naturais de água que se acumulam abaixo da superfície da Terra, contemplando os espaços entre as rochas e os sedimentos em aquíferos.

As reservas subterrâneas representam uma fonte segura e indispensável de água doce, sendo amplamente empregadas em atividades humanas, como irrigação, consumo doméstico e processos industriais. No entanto, a escassez hídrica afeta aproximadamente 4 bilhões de pessoas no mundo, que enfrentam dificuldades no acesso à água por pelo menos um mês ao ano. A principal causa do esgotamento das reservas subterrâneas é a irrigação, responsável por cerca de 70% do consumo total de água. Estima-se que a captação de águas subterrâneas aumente significativamente nas próximas décadas, passando de 800 km³ anuais para aproximadamente 1.100 km³ por ano até 2050 (Singh *et al.*, 2011; Gude; Maganti, 2021).

Segundo Santos e Mohr (2014), a água subterrânea é considerada mundialmente como uma fonte de abastecimento para o consumo humano, principalmente para as populações que não têm acesso à rede pública de abastecimento ou até para aqueles que, mesmo com o acesso, possuem o fornecimento de forma irregular. Uma preocupação ambiental relevante é a presença de contaminantes em baixas concentrações, que contribuem significativamente para a poluição dos recursos hídricos. Sabe-se que a qualidade das águas subterrâneas tem se deteriorado devido às descargas não controladas de contaminantes presentes em fontes pontuais e difusas. E o risco de contaminação geralmente é função dos fatores hidrogeológicos e antrópicos, entre estes, a distribuição das atividades humanas desenvolvidas na superfície e na subsuperfície, que impõem sobre o solo a quantidade, a frequência e as propriedades químicas dos contaminantes gerados (Castañeda; Passos; Benetti, 2012; Rios, 2020).

Além disso, atividades antropogênicas, como desmatamento, urbanização e uso excessivo de água, alteram o ciclo hidrológico natural, impactando processos essenciais como evaporação, precipitação e escoamento. O esgotamento dos recursos hídricos torna-se cada vez mais evidente, impulsionado pelo crescimento populacional e pelo aumento dos padrões de consumo (Mukherjee *et al.*, 2020; Pradhan *et al.*, 2023). Isso motiva os pesquisadores a realizarem estudos de monitoramento das águas ambientais, mais especificamente das águas subterrâneas rasas para melhor entendimento sobre o estado de preservação desse recurso (Santos, 2022).

Diversos estudos em países dos cinco continentes apontam que as concentrações de substâncias dissolvidas

em águas subterrâneas tendem a aumentar, à medida que percorrem diferentes ambientes hidrogeológicos, além da interferência humana, entre estas, destaca-se a presença de nitrato (Mattos *et al.*, 2017). Entre os contaminantes presentes, um dos mais conhecidos é o nitrato, dada à sua elevada solubilidade e estabilidade química, o que lhes permite alcançar grandes áreas. Outras fontes de contaminação incluem lixões, aterros sanitários, resíduos de produtos industriais e manuseio inadequado de agrotóxicos e pesticidas (Stradioto; Teramoto; Chang, 2019).

Análises utilizando espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS) são feitas para avaliar as composições de elementos traço na água subterrânea. Abba *et al.* (2024) examinaram a presença de metais e metaloides em águas subterrâneas e observaram que os valores encontrados para as concentrações de cromo e ferro ultrapassaram os limites recomendados para qualidade da água potável, afirmando que isso representa sérias ameaças à usabilidade dessas águas. Também apontaram que os vários índices de poluição, incluindo grau de contaminação, índice de poluição por metais pesados e índice de metais pesados modificado, indicaram baixos níveis de poluição das águas subterrâneas verificadas.

No semiárido baiano, estudos apontam que aquíferos do município de Boquira (localizado na porção centro-sul do estado da Bahia) apresentam concentrações de metais como cálcio, ferro, magnésio e sódio acima dos limites máximos para consumo humano, essa região concentrou a maior mina de Pb e Zn do Brasil no período de 1960 e 1992, embora as maiores concentrações de Pb, Zn e Cd tenham sido registradas nas águas provenientes das galerias da mina subterrânea e da bacia de rejeitos, os recursos hídricos avaliados não apresentaram níveis elevados desses metais (Daltro; Cabral; Demétrio, 2020). Além disso, investigações em Candeias, BA, indicando altos teores de nitrato, cloreto e sulfato, sobretudo na estação seca, evidenciam poluição difusa em áreas rurais do semiárido (Santos *et al.*, 2024). Em estudo realizado em área urbana de Feira de Santana, BA, verificou-se contaminação por metais pesados em cerca de 77 % dos poços analisados (Lima *et al.*, 2010), o que evidencia a necessidade de maior monitoramento também no semiárido baiano.

Os metais podem ser aderidos aos sedimentos por diferentes mecanismos, estes se associam e migram por precipitação, adsorção e assimilação biológica. A adsorção pode ocorrer com hidróxidos de Fe e Mn, com matéria orgânica particulada ou com argilominerais. O agrupamento Al³⁺-OH ou Si-OH gera uma alteração no pH do meio. Nem todo metal retido pode ser considerado um contaminante, é necessário realizar estudos, e a determinação da forma química em que se encontra é que poderá caracterizá-lo como poluente ou não (Souza *et al.*, 2015).

Nos últimos anos, os avanços tecnológicos têm possibilitado métodos mais eficientes e precisos de identificação dos contaminantes presentes em águas subterrâneas. Pesquisas realizadas atualmente propõem a avaliação de alternativas para o tratamento desses contaminantes que acarretem um melhor custo-benefício. No Brasil, exemplos de estudos envolvem a remediação natural (Corseuil; Marins, 1997); filtração em margem (FM) (De Paiva; Cabral; Demétrio, 2008); aplicação de métodos de eletrorresistividade e polarização induzida e técnicas de extração como bombeamento e monitoramento de poços subterrâneos (Braga, 2006).

Diante desse cenário, a prospecção de tecnologias validadas serve para orientar políticas públicas e apoiar soluções adaptadas às condições do semiárido brasileiro. Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo mapear tecnologias inovadoras sobre a contaminação de águas subterrâneas, com foco na identificação de métodos validados para a detecção da presença de metais e a caracterização de interesse ambiental. Os critérios de seleção incluem custo, eficácia analítica, aplicabilidade em regiões de infraestrutura limitada, bem como a possibilidade de expansão de uso das tecnologias. Esse mapeamento tem como intuito apoiar o desenvolvimento de soluções mais simples e de baixo custo para o monitoramento da qualidade da água na região do semiárido baiano. O estudo analisa patentes (período de 1990-2025) e artigos científicos (período de 1994-2025), identificando lacunas e oportunidades para adaptação às condições locais.

2 Metodologia

Foram realizadas buscas em bases de patente internacional e em bases de dados de periódicos científicos com o intuito de analisar o avanço em pesquisas sobre métodos, processos e dispositivos usados para determinar a presença de contaminantes, mais especificamente a presença de metais e metaloides. Para a busca no banco de patentes internacionais, utilizou-se a base de dados do Espacenet. Os artigos sobre o tema foram obtidos do acesso ao Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoas de Nível Superior (Capes) e da base de periódicos científicos, Scopus. A metodologia da pesquisa foi realizada em duas etapas.

Na primeira etapa, foram definidas as palavras-chave associadas ao tema, conforme mostrado na Tabela 1. Para um resultado preciso, foram utilizados os operadores booleanos “OR”, com o objetivo de adicionar termos semelhantes e “AND” para limitar as buscas adicionando as palavras específicas, além do operador “*” para a busca de variantes dos termos empregados. A pesquisa nas bases de dados ocorreu no período de setembro de 2024 a janeiro de 2025, sendo atualizado a cada mês até a finalização do trabalho. Os documentos de patente do ano de 2025 não estavam disponíveis no período do estudo dos dados devido ao período de sigilo.

Tabela 1 – Escopo de estratégia de busca: palavras-chave utilizadas nas buscas de patentes

GRUPOS	COMBINAÇÃO DE PALAVRAS-CHAVE	ESPACENET
I	groundwater OR subterranean water OR artesian water	46.487
II	groundwater OR subterranean water OR artesian water AND metal*	4.909
III	groundwater OR subterranean water OR artesian water AND metal* AND pollutant*	1.138
IV	groundwater OR subterranean water OR artesian water AND metal* AND environmental sample*	7
V	groundwater OR subterranean water OR artesian water AND metal* AND pollutant* AND environmental sample*	3
VI	groundwater OR subterranean water OR artesian water AND salinit*	512
VII	groundwater OR subterranean water OR artesian water AND reuse*	980
VIII	groundwater OR subterranean water OR artesian water AND metal* AND pollutant* AND reuse*	63
IX	groundwater OR subterranean water OR artesian water AND metal* AND pollutant* AND techn*	844
X	groundwater OR subterranean water OR artesian water AND metal* AND pollutant* AND techn* AND C02F	545
XI	groundwater OR subterranean water OR artesian water AND metal* AND pollutant* AND techn* AND C02F AND B09C	105
XII	groundwater OR subterranean water OR artesian water AND metal* AND pollutant* AND techn* AND C02F AND E03B	6
XIII	groundwater OR subterranean water OR artesian water AND metal* AND pollutant* AND techn* AND E03B	9
XIV	groundwater OR subterranean water OR artesian water AND metal* AND pollutant* AND E03B	12

Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo (2025)

O Quadro 1 descreve o significado dos códigos da Classificação Internacional de Patentes utilizados nas buscas.

A Tabela 2 mostra as palavras-chave utilizadas na estratégia de busca na base de dados de artigo. Foi escolhida a base Scopus devido ao seu amplo registro de arquivos e a alta qualidade na revisão dos periódicos, possibilitando um melhor mapeamento da pesquisa. A combinação de palavras foi a mesma utilizada na busca de patentes, houve apenas substituição do código CIP por termos equivalentes. Essa escolha buscou fazer a pesquisa de documentos semelhantes para enriquecer o estudo e possibilitar uma análise mais integrada entre o desenvolvimento tecnológico e a produção científica relacionada ao tema.

Além disso foi possível ampliar a abrangência dos resultados, considerando publicações científicas que tratam de tecnologias e processos correlatos, mesmo que não vinculados diretamente ao registro de patentes. Essa estratégia também permitiu identificar possíveis lacunas entre o que está sendo desenvolvido nas academias e na indústria, contribuindo para uma compreensão mais ampla das tendências e dos desafios no monitoramento e na remediação de poluentes em águas de poço. A utilização da base de artigos, portanto, não apenas complementa os dados obtidos na base de patentes, mas também fortalece a robustez da análise ao integrar diferentes fontes de informação científica e tecnológica.

Quadro 1 – Significado dos códigos da Classificação Internacional de Patentes (CIP)

CÓDIGOS DA CLASSIFICAÇÃO INTERNACIONAL DE PATENTE (CIP)	DESCRIÇÃO
B09C	Subclasse referente à recuperação (eliminação) de solos contaminados.
C02F	Subclasse referente ao tratamento de água, de águas residuais, de esgotos ou de lamas e lodos.
E03B	Subclasse referente a instalações ou métodos para obtenção, coleta e distribuição de água, como perfuração de poços.

Fonte: Elaborado pelos autores deste artigo com base em dados do INPI (2025)

Tabela 2 – Escopo de estratégia de busca e palavras-chave utilizadas na base de dados de artigos

GRUPOS	COMBINAÇÃO DE PALAVRAS-CHAVES	SCOPUS
I	groundwater OR subterranean water OR artesian water	248.605
II	groundwater OR subterranean water OR artesian water AND metal*	18.713
III	groundwater OR subterranean water OR artesian water AND metal* AND pollutant*	5.694
IV	groundwater OR subterranean water OR artesian water AND metal* AND environmental sample*	2.307
V	groundwater OR subterranean water OR artesian water AND metal* AND pollutant* AND environmental sample*	1.137
VI	groundwater OR subterranean water OR artesian water AND salinit*	12.807
VII	groundwater OR subterranean water OR artesian water AND reuse*	3.111
VIII	groundwater OR subterranean water OR artesian water AND metal* AND pollutant* AND reuse*	143
IX	groundwater OR subterranean water OR artesian water AND metal* AND pollutant* AND techn*	1.356
X	groundwater OR subterranean water OR artesian water AND metal* AND pollutant* AND techn* AND water treatment*	638
XI	groundwater OR subterranean water OR artesian water AND metal* AND pollutant* AND techn* AND water treatment* AND contaminated soil*	91
XII	groundwater OR subterranean water OR artesian water AND metal* AND pollutant* AND techn* AND water treatment* AND well drilling	2
XIII	groundwater OR subterranean water OR artesian water AND metal* AND pollutant* AND techn* AND well drilling	7
XIV	groundwater OR subterranean water OR artesian water AND metal* AND pollutant* AND well drilling	24

Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo (2025)

Os códigos da CIP utilizados na busca de patentes foram trocados por termos e palavras semelhantes às descrições dos códigos, com aplicação das seguintes expressões: *water treatment* em substituição ao código C02F; *contaminated soil* para substituir o código B09C; e *well drilling* para o E03B.

Na segunda etapa, optou-se, entre os grupos de palavras-chave, aqueles que mais se adequam ao objetivo da pesquisa, sendo escolhido o Grupo XI em ambas as buscas (Tabela 1 e Tabela 2), os demais termos não foram utilizados devido ao elevado número de documentos resultantes, o que inviabilizaria a análise no período estabelecido. Além disso, muitos desses documentos não abordavam especificamente metais e/ou se referiam a conteúdos já contemplados nos grupos de palavras-chave previamente adotados. A partir dos dados obtidos, foram realizadas leituras dos resumos, análise de dados e estudo dos arquivos baixados, após análise detalhada, foram gerados gráficos no Microsoft Excell® para melhor compilação dos resultados obtidos. Além disso, realizou-se um levantamento acerca da quantidade de patentes depositadas por ano, dos países de origem das patentes, das instituições filiadas às patentes, dos autores das patentes e da área de conhecimento abrangida. Durante a etapa de leitura, todos os artigos e patentes foram revisados cuidadosamente. Não houve exclusões, uma vez que todos os documentos selecionados apresentaram relação direta com o tema abordado neste estudo. No total, foram lidos 196 resumos. A triagem foi conduzida por dois estudantes, utilizando softwares de análise de patentes, como Orbit®, seguindo critérios, como metodologia adotada, amostragem, área de estudo, parâmetros utilizados, países, ano e estágio da tecnologia, para identificar documentos diretamente relacionados ao tema pesquisado.

Destaca-se que, neste estudo inicial, não foram utilizados filtros específicos relacionados ao clima ou às condições geológicas. A busca mais ampla foi escolhida para identificação de tecnologias emergentes possíveis de serem aplicadas tanto para detecção da presença de contaminantes metálicos e metaloides quanto nos métodos de remediação. Posteriormente, esses resultados ajudarão na realização de estudos nas condições do semiárido baiano, região que apresenta baixa recarga hídrica, aquíferos com elevada salinidade, intenso uso de poços tubulares e comunidades locais com vulnerabilidade socioeconômica. Assim, a aplicabilidade das tecnologias será avaliada com base em critérios de viabilidade técnica e custo-benefício.

3 Resultados e Discussões

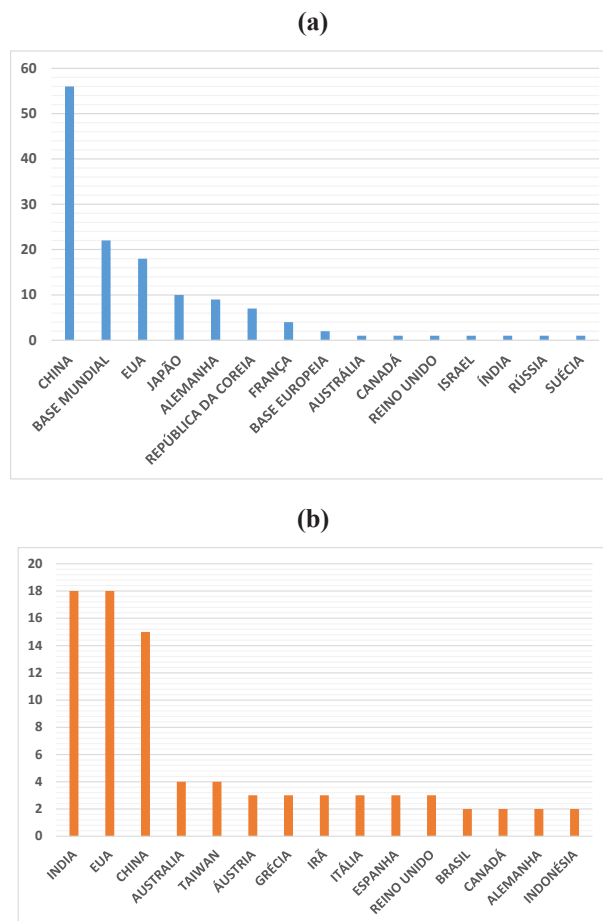
A elevada incidência de publicações científicas e pedidos ou depósitos de patentes relacionados à detecção e ao monitoramento de contaminantes, entre eles, metálicos, em águas subterrâneas, demonstra o interesse da comunidade científica e tecnológica nesse tema. Essa busca mostra

um avanço significativo em desenvolvimento de técnicas analíticas, sensores e plataformas de monitoramento, refletindo tanto o potencial de pesquisa ambiental quanto a busca estratégica por soluções inovadoras.

No entanto, o número de publicações é maior do que o número de pedido de proteção, possivelmente em função da falta de cultura e de conscientização de proteção da tecnologia inventada entre pesquisadores, o que compromete a transferência e a valorização das tecnologias geradas. Isso pode ser comprovado observando a Tabela 2, na qual é possível perceber que há muita pesquisa sendo desenvolvida sobre esse tema nas academias. Devido à grande quantidade de artigos encontrados, a busca foi refinada para que fosse possível realizar a leitura de estudos mais detalhada, assim foram selecionados e analisados 91 artigos.

A Figura 1 apresenta a distribuição dos países com mais depósito de patentes (Figura 1a) e mostra a distribuição de países com maior quantidade de artigos científicos (Figura 1b) relacionados à detecção de metais e metaloides em ambientes contaminados.

Figura 1 – Família de patentes (a) e artigos (b) por país de prioridade



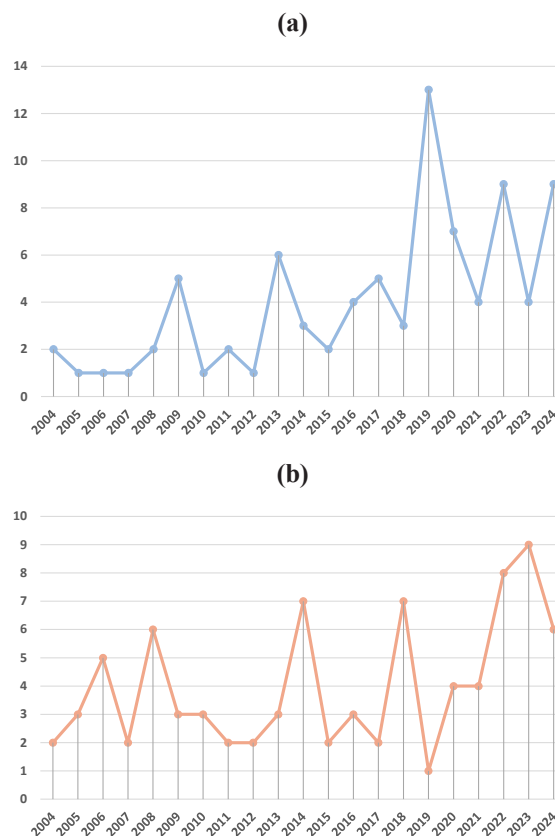
Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo (2025)

Observa-se uma predominância significativa de depósito de documentos de patentes (Figura 1a) oriundos de países como China (56 documentos) e Estados Unidos (18 documentos), evidenciando a forte representatividade dessas nações nas pesquisas e nas inovações tecnológicas voltadas para o tema. Também é possível observar que aproximadamente 22 documentos de patentes estão depositados na base mundial, que reúne informações das patentes de vários países. Esse domínio pode ser associado à robustez dos investimentos em pesquisa e desenvolvimento, bem como à infraestrutura laboratorial avançada. A abordagem de monitoramento e a remediação adotada por esses países incluem tanto estratégias convencionais, como bombeamento e tratamento, quanto métodos emergentes, como o uso de nanopartículas biossintéticas para a remoção de poluentes (Zafar *et al.*, 2024). Essas nanopartículas, produzidas a partir de organismos vivos como bactérias, fungos, algas e plantas, destacam-se na remoção de poluentes ambientais, como metais pesados, corantes industriais e compostos orgânicos tóxicos, graças às suas propriedades únicas, como alta área de superfície e reatividade química. Seu mecanismo de ação abrange a adsorção, capturando poluentes em sua superfície; a redução química, transformando poluentes tóxicos em formas menos nocivas; a degradação catalítica, acelerando reações químicas que quebram moléculas poluentes; e a interação eletrostática, atraindo e retraindo poluentes com cargas opostas (Singh *et al.*, 2018).

Ainda assim, observa-se um destaque também em países europeus, como Alemanha e Reino Unido, mas com uma representatividade menor em comparação aos líderes globais. No entanto, ao observar os gráficos, nota-se que a contribuição do Brasil (Figura 2b) ainda é modesta em número de artigos publicados em comparação aos países líderes, como Índia (18 artigos), Estados Unidos (18 artigos) e China (15 artigos). Esse cenário evidencia que investir em estudos sobre o tema é promissor. Além disso, é importante fortalecer as políticas de investimentos contínuos e de colaboração entre universidades e centros de pesquisa para ampliar a produção científica e tecnológica na área de monitoramento e remediação de metais e metalóides.

Em consonância com essa necessidade, a Figura 2 demonstra a evolução temporal das publicações e proteções dos últimos 20 anos, apresentando a quantidade de patentes depositadas (2a) e os artigos publicados (2b) anualmente.

Figura 2 – Família de patentes (a) e artigos (b) publicados por ano



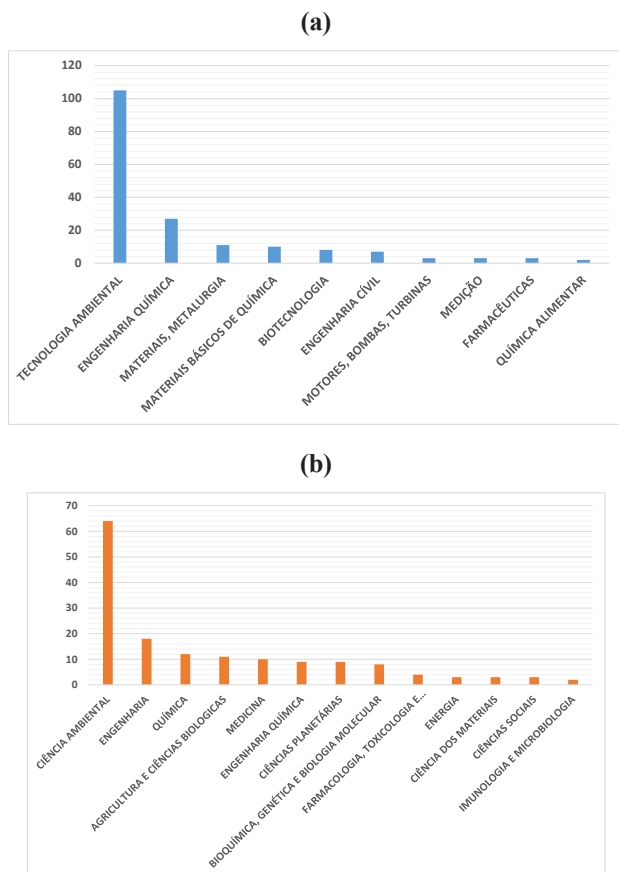
Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo (2025)

Observa-se um crescimento contínuo ao longo do período, com pico notável em 2019, referente ao depósito de patentes (Figura 2a) e 2023 se referindo ao número de depósito de artigos (Figura 2b), que pode ser interpretado como uma resposta às crescentes preocupações ambientais globais e à necessidade de métodos mais eficientes para monitoramento e remediação de metais pesados em solos e águas subterrâneas. Em diversas pesquisas recentes, observa-se um movimento em direção a técnicas que integram processos químicos e biológicos para aprimorar a eficácia dos tratamentos. A busca por soluções inovadoras para a remediação ambiental tem impulsionado o desenvolvimento de técnicas avançadas, como a mineralização de substâncias polifluoroalquílicas (PFAS) por oxidação de persulfato e a precipitação de carbonato induzida por microrganismos. A oxidação de persulfato utiliza persulfato ativado para gerar radicais sulfato, que decompõem os PFAS em compostos menos nocivos, oferecendo uma abordagem eficaz para a remediação de solos e águas contaminadas. Já a precipitação de carbonato

induzida por microrganismos (MICP) explora a capacidade de certas bactérias de induzir a precipitação de carbonato de cálcio, imobilizando poluentes e fortalecendo solos contaminados. Ambas as técnicas representam avanços significativos na busca por soluções sustentáveis para a remediação de ambientes contaminados. Métodos como a mineralização de substâncias polifluoroalquílicas por oxidação de persulfato e a precipitação de carbonato induzida por microrganismos têm demonstrado potencial na descontaminação de águas subterrâneas, proporcionando abordagens sustentáveis para lidar com esses poluentes (Cook *et al.*, 2025; Taharia *et al.*, 2024).

Esse foco em abordagens inovadoras e interdisciplinares, que se reflete na predominância de estudos em engenharia ambiental e ciências aplicadas, observado na Figura 3, sinaliza uma tendência na busca por soluções avançadas para a remediação de metais pesados. A Figura 3 evidencia as principais áreas de conhecimento relacionadas às patentes (3a) e artigos (3b) encontrados, em que se observa a predominância de estudos voltados para a engenharia ambiental e as ciências aplicadas, que apresentam os maiores índices de depósitos e publicações (Figura 3).

Figura 3 – Família de patentes (a) e artigos (b) por área de pesquisa

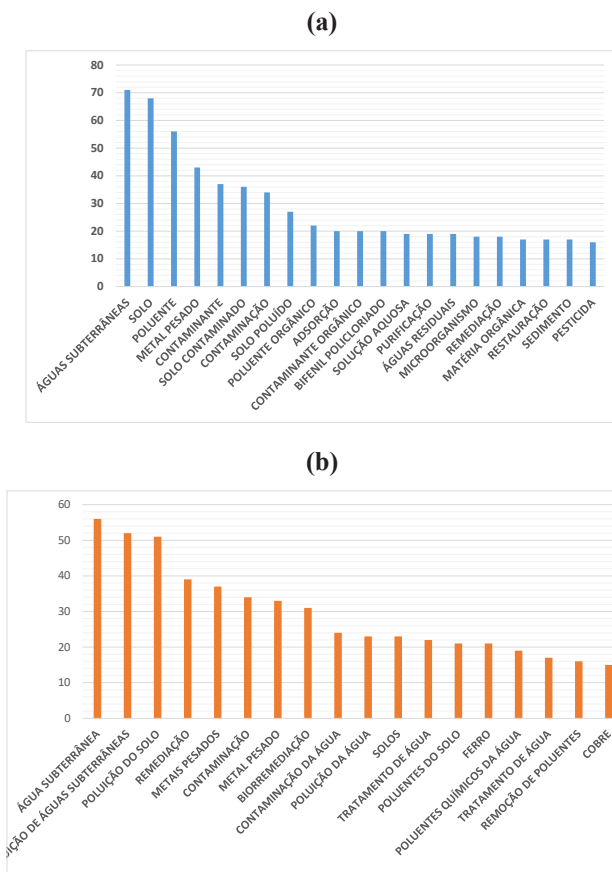


Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo (2025)

Pode-se observar, na Figura 3, algumas áreas relevantes que se destacam no desenvolvimento de tecnologias de remediação, como a tecnologia ambiental, engenharia química e engenharia de materiais. Essas áreas superam outras representações como áreas farmacêuticas e de imunologia. Esse cenário apresenta a necessidade de uma abordagem interdisciplinar para a resolução dos problemas ambientais associados à contaminação por metais e metaloides. A aplicação de técnicas, como biorremediação assistida por plantas e nanobiorremediação, tem sido discutida como alternativa eficaz para a remoção de metais pesados do solo e da água, superando algumas limitações dos processos convencionais. Essas estratégias combinam processos químicos e biológicos, permitindo uma remoção mais eficiente dos poluentes e reduzindo os impactos ambientais associados a técnicas de remediação mais agressivas (Tennakoon *et al.*, 2024; Zafar *et al.*, 2024).

A Figura 4 mostra as principais palavras-chave utilizadas em patentes (4a) e artigos (4b) relacionados à contaminação de águas subterrâneas. Observa-se que o termo “águas subterrâneas” aparece como o mais frequente, indicando o foco recorrente de estudos e inovações tecnológicas nesse tipo de recurso hídrico.

Figura 4 – Principais palavras-chave utilizadas em (a) patentes e (b) artigos



Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo (2025)

Ainda na Figura 4 (4a), outras palavras-chave com alta incidência incluem solo, poluente, metal pesado e solo contaminado, indicando preocupações com a contaminação do solo e sua interação com águas subterrâneas. Já nos artigos encontrados (Figura 4b), além de poluição do solo e metais pesados, destaca-se a presença da palavra remediação, a quarta mais citada, mencionada em 40 publicações.

Entre os anos de 2004 e 2024, vários pesquisadores investigaram técnicas de descontaminação de aquíferos subterrâneos, como o uso de barreiras reativas instaladas *in situ*, aplicadas especialmente em áreas impactadas por solventes clorados (Gusmão *et al.*, 2004). Após um determinado período, novas abordagens foram incorporadas, incluindo nanopartículas, fitorremediação, oxidação com persulfato, e técnicas combinadas como PAT (*pump and treat*), CEP (cossolvente/eletrocínica/bombeamento) e lavagem com cloreto férrico.

Apesar da menor frequência em depósito de patentes (19 documentos), o termo remediação aparece em registros tecnológicos de destaque, como um modelo de utilidade baseado em barreiras reativas permeáveis de dupla unidade, utilizando materiais como zeólita, rocha vulcânica e biochar ativado (uma alternativa sustentável ao carvão ativado) para aumentar a eficiência na adsorção de metais pesados (CN222447679). A biorremediação também é destaque, aparecendo em 31 artigos (Figura 4b), evidenciando o interesse crescente por técnicas sustentáveis que utilizam microrganismos e plantas para reduzir a concentração de contaminantes por meio de processos como modificação do pH, reações redox e adsorção (Tennakoon *et al.*, 2024).

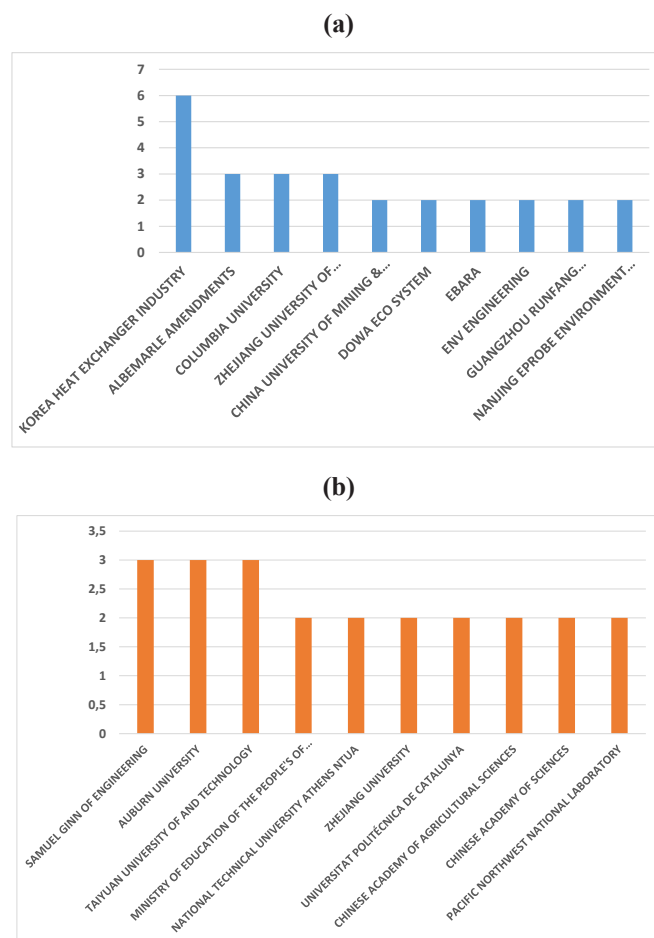
Por fim, entre as palavras mais frequentes em patentes (Figura 4a), observa-se uma predominância de termos associados a contaminantes orgânicos, com destaque para o Bifenil Policlorado, um composto tóxico e persistente, cujo tratamento tem sido alvo de diversas inovações tecnológicas.

Entre as principais instituições cessionárias de patentes representadas na Figura 5a, a Korea Heat Exchanger Industry, indústria fabricante de trocadores de calor para refinaria de petróleo, plantas petroquímicas, usinas de energia e plataformas *offshore*, detém a cessão de seis famílias de patentes com 23 invenções patenteadas, desenvolvendo dispositivos para a purificação do solo contaminado com alta potência magnética.

A Albermale Amendments (Figura 5a), empresa norte-americana, atua em diversas áreas, entre elas química de processos, transformação de recursos minerais e tecnologias de conversão. No âmbito ambiental, desenvolve iniciativas de gestão responsável de recursos naturais, incluindo água, e possui compromissos públicos de redução de emissões e uso eficiente de recursos. A empresa mantém operações e projetos em diversos países, com presença em

regiões de extração e processamento que podem envolver aquíferos e gestão hídrica. Possui um elevado número de invenções patenteadas e uma cobertura de mercado que abrange os cinco continentes (América, Ásia, Oceania, África e Europa), ocupa a segunda posição, juntamente com a Zhenjiang University of Technology e a Columbia University, enquanto a China University of Mining e Technology ocupa terceira posição no depósito de patentes sobre o tema estudado (Albermale Corporation, 2025).

Figura 5 – Dez principais instituições cessionárias de patentes (a) e afiliadas à publicação de artigos (a)



Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo (2025)

Em relação às instituições afiliadas ao Scopus (Figura 5b), Samuel Ginn College of Engineering e a Auburn University, universidades norte-americanas, ocupam a primeira posição, detendo três artigos publicados cada, focando no estudo de nanopartículas para a remediação do solo e de águas subterrâneas. Observa-se que a China possui a maior quantidade de instituições, tendo ao todo cinco representantes (Taiyuan University of Science and Technology e Zhenjiang University, agência governamental Ministry of Education of the People's Republic of China, Chinese Academy of Agricultural Science e Chinese

Academy of Science), os quais desenvolveram estudos sobre uma nova tecnologia de remediação: para degradação *in situ* de estrogênios, fornecendo uma nova classe de nanopartículas de óxido de manganês (MnO) estabilizadas em solos contaminados (Han; Zhang; Zhao, 2017); aplicação de partículas apatitas; aplicações de partículas de ferro zero valente e biorremediação. Aparece também (Figura 5b) a National Technical University of Athens, universidade grega, com um artigo publicado sobre a nanorremediação, e um artigo sobre biorremediação, evidenciando a contribuição internacional para a pesquisa dessas tecnologias.

4 Considerações Finais

A partir da prospecção tecnológica realizada, é possível observar um cenário global de crescente atenção e investimento em tecnologias voltadas para a detecção e remediação de contaminantes, entre eles, metálicos e metaloides em águas subterrâneas. A análise aprofundada dos documentos de patentes e dos artigos revela não apenas o aumento quantitativo de proteção e produção científica, mas também a intensificação do interesse industrial em soluções para esse desafio ambiental crítico. Esse aumento é evidenciado pelo número crescente de publicações e patentes depositadas anualmente, o que reflete uma resposta da comunidade científica e tecnológica às crescentes preocupações com a qualidade da água e a necessidade de proteger esse recurso vital.

A predominância de pesquisas e inovações oriundas de países como China e Estados Unidos salienta a forte representatividade dessas nações no desenvolvimento de tecnologias para o monitoramento e o tratamento de águas subterrâneas. Esse domínio pode ser atribuído a diversos fatores, incluindo investimentos robustos em pesquisa e desenvolvimento, infraestrutura laboratorial avançada e políticas governamentais que incentivam a inovação na área ambiental. A capacidade desses países de transformar o conhecimento científico em soluções tecnológicas patenteadas demonstra um ecossistema de inovação consolidado, e a academia e a indústria colaboram para enfrentar os desafios da contaminação hídrica.

Além disso, a liderança de instituições como a Korea Heat Exchanger Industry e a Albermale Amendments no depósito de patentes evidencia que o setor industrial se destaca na geração e na aplicação de tecnologias nessa área. A atuação dessas empresas em escala global, oferecendo soluções para a purificação do solo e da água contaminados por metais pesados, indica o potencial de mercado e a demanda por tecnologias eficazes nesse campo.

Os resultados possuem implicações significativas para diferentes regiões do mundo, especialmente aquelas mais vulneráveis à escassez hídrica e à contaminação dos

recursos subterrâneos. A disponibilidade de tecnologias avançadas para a detecção e remediação de metais e metaloides em águas subterrâneas pode contribuir para garantir a qualidade da água para o consumo humano, a agricultura e outras atividades econômicas. Além disso, o desenvolvimento de soluções adaptadas às condições específicas de cada localidade, como a utilização de materiais disponíveis regionalmente e a consideração das características hidrogeológicas locais, pode aumentar a eficácia e a sustentabilidade das tecnologias de remediação.

A colaboração entre instituições de pesquisa, órgãos governamentais, empresas e comunidades é essencial para garantir o sucesso da adoção de tecnologias de remediação e para promover a gestão integrada dos recursos hídricos.

Em suma, a pesquisa apresentada neste artigo oferece um panorama abrangente do cenário global de tecnologias para a detecção e remediação de metais e metaloides em águas subterrâneas. Os resultados destacam o potencial de inovação e aplicação dessas tecnologias, bem como a importância de considerar as especificidades de cada contexto, para garantir a sua eficácia e sustentabilidade.

5 Perspectivas Futuras

Os dados demonstram que, além das principais potências mundiais, países europeus e o próprio Brasil têm realizado estudos voltados para a monitoração ou a descontaminação de poços subterrâneos. Isso indica uma tendência de expansão nas pesquisas e o aprimoramento de técnicas e métodos voltados para a remediação nos próximos anos.

Diante desse cenário, espera-se que as aplicações dessas pesquisas se tornem ainda mais interdisciplinar, envolvendo áreas como tecnologia ambiental, engenharia, química, farmacêutica e metalúrgica. Entre as inovações que tendem a ganhar destaque, encontram-se a nanotecnologia, com a utilização de nanopartículas para a remoção de metais pesados, biorremediação, por meio da utilização de microrganismos; e fitorremediação, com o cultivo de plantas acumuladoras de metais, como uma alternativa sustentável.

Entretanto, para garantir avanços significativos, a integração entre diferentes áreas de conhecimentos e o desenvolvimento de soluções eficazes são fundamentais para impulsionar a inovação e gerar novas descobertas tecnológicas que visam à preservação e recuperação de recursos hídricos subterrâneos. Será essencial ampliar investimentos em pesquisa e desenvolvimento que possam fortalecer a relação academia, indústria e órgãos governamentais. Assim, o acompanhamento contínuo de novas patentes e dos investimentos em pesquisa na área será determinante para viabilizar soluções para o controle e a preservação de águas subterrâneas a longo prazo.

Referências

- ABBA, S. I. *et al.* Trace element pollution tracking in the complex multi-aquifer groundwater system of Al-Hassa oasis (Saudi Arabia) using spatial, chemometric and index-based techniques. **Environmental Research**, v. 249, p. 118320, 2024.
- ALBEMARLE CORPORATION. **Albemarle – Overview. Charlotte**: Albemarle Corporation, 2025. Disponível em: <https://investors.albemarle.com/overview/default.aspx>. Acesso em: 26 nov. 2025.
- BRAGA, A. C. de O. **Métodos da eletroresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas**: uma abordagem metodológica e prática. 2006. 121f. Tese (Doutorado em Livre-Docência) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, São Paulo, 2006.
- CASTAÑEDA, D.; PASSOS, K.; BENETTI, A. Remoção de sulfeto de hidrogênio, ferro e manganês de águas de abastecimento por aeração e dessorção por ar. **Revista DAE**, São Paulo, n. 188, 2012.
- COOK, Emily K. *et al.* Practical considerations for the optimization of in situ mineralization of perfluorocarboxylic acids and polyfluoroalkyl substances using persulfate oxidation. **Water Research**, v. 273, n. 123015, 2025.
- CORSEUIL, H. X.; MARINS, M. D. M. Contaminação de águas subterrâneas por derramamentos de gasolina: o problema é grave? **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 2, n. 2, p. 50-54, 1997.
- DALTRO, R. R.; ANJOS, J. Â. S. A.; RABELO GOMES, M. C. Avaliação de metais pesados nos recursos hídricos do município de Boquira, no semiárido baiano – Brasil. **Geociências**, São Paulo, v. 39, n. 1, p. 139-152, maio 2020.
- DE PAIVA, A. L. R.; CABRAL, J. J. da S. P.; DEMÉTRIO, J. G. A. Exploração conjunta de água subterrânea e água superficial induzida através de bombeamento próximo a mananciais. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, 2008.
- FEI, Z.; XIAOXIN, F. **In-situ groundwater heavy metal pollution restoration device**. Titular: Huatian Engineering & Technology Corporation MCC. CN222447679 U. Depósito: 27 maio 2024.
- GUDE, V. G.; MAGANTI, A. Desalination of deep groundwater for freshwater supplies Global Groundwater. **Elsevier**, p. 577-583, 2021.
- GUSMÃO, A. D. *et al.* Laboratory test for reactive barrier design. **Journal of Hazardous Materials**, v. 110, p. 105-112, jul. 2004.
- HAN, B.; ZHANG, M.; ZHAO, D. In-situ degradation of soil-sorbed 17B-estradiol using carboxymethyl cellulose stabilized manganese oxide nanoparticles: Column studies. **Environmental Pollution**, v. 223, p. 238-246, 2017.
- LEITE, A. B. Remoção de H₂S em água subterrânea pelo método de dessorção gasosa. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 9, n. 1, p. 135-147, 2021. DOI: 10.9771/gesta.v9i1.43800.
- LIMA, A. C. P. *et al.* Avaliação das concentrações de bário e chumbo em águas do aquífero freático do entorno do Centro Industrial do Subaé – Feira de Santana-BA. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, 6 set. 2010. [suplemento de anais de congresso]. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22914>. Acesso em: 1º set. 2025.
- MATTOS, J. B. *et al.* Tipologia hidrogeoquímica e qualidade das águas subterrâneas na área urbana do município de Lençóis, Bahia, nordeste do Brasil. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 31, n. 3, p. 281-295, 2017. DOI: 10.14295/ras.v31i3.28852.
- MENEZES, A. P. *et al.* **Relatório de caracterização da bacia**: plano de ações estratégicas para gerenciamento dos recursos hídricos das bacias hidrográficas do rio Paraguaçu e do recôncavo norte e Inhambupe: bacias hidrográficas do recôncavo norte e Inhambupe. [S.l.]: INEMA, 2018.
- MUKHERJEE, A. *et al.* (ed.). Global groundwater: source, scarcity, sustainability, security, and solutions. **Elsevier**, p. 1-43. 2020.
- PRADHAN, B. *et al.* Emerging groundwater contaminants: A comprehensive review on their health hazards and remediation technologies. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 20, p. 100868, 2023.
- RIOS, I. H. R. **Estudo do risco de contaminação de aquíferos da região de Feira de Santana como ferramenta de apoio à gestão e gerenciamento de águas subterrâneas**. 2020. 139f. Dissertação (Mestrado em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2020.
- SANTOS, C. de J. Mapeamento da qualidade da água subterrânea rasa através de índice físico-químico em Campos dos Goytacazes. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, v. 16, n. 2, p. 39-56, 2022.
- SANTOS, J. S. *et al.* Groundwater contamination in a rural municipality of Northeastern Brazil: application of geostatistics, geoprocessing, and geochemistry techniques. **Water, Air, and Soil Pollution**, Dordrecht, v. 235, n. 3, p. 1-18, fev. 2024.

SANTOS, R. S.; MOHR, T. Saúde e qualidade da água: análises microbiológicas e físico-químicas em água subterrâneas. **Revista Contexto & Saúde**, v. 13, n. 24-25, p. 46-53, 2014. DOI: 10.21527/2176-7114.2013.24-25.46-53.

SINGH, C. K. *et al.* Application of GWQI to assess effect of land use change on groundwater quality in lower Shiwaliks of Punjab: remote sensing and GIS based approach. **Water Resources Management**, v. 25, p. 1881-1898, 2011.

SINGH, J. *et al.* Green's synthesis of metals and their oxide nanoparticles: applications for environmental remediation. **Journal of nanobiotechnology**, v. 16, n. 1, p. 84. 2018.

SOUZA, V. L. *et al.* Biodisponibilidade de metais-traço em sedimentos: uma revisão. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, v. 3, n. 1A (Suppl.), 2015.

STRADIOTO, M. R.; TERAMOTO, E. H.; CHANG, H. K. Nitrato em águas subterrâneas do estado de São Paulo. **Revista de Instituto Geológico**, v. 40, n. 3, p. 1-12, 2019.

TAHARIA, M. D. *et al.* Microbial induced carbonate precipitation for remediation of heavy metals, ions and radioactive elements: A comprehensive exploration of prospective applications in water and soil treatment. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 271, n. 115990, 2024.

TENNAKOON, Asanka *et al.* Plant-assisted bioremediation of heavy metals in soil and water. *In*: SINGH, Nand K.; AFZAL, Shadma; AFTAB, Tariq (org.). **Phytoremediation and biofortification: strategies for sustainable environmental and health management**. India: Apple Academic Press, 2024. p. 99-129.

ZAFAR, Sara *et al.* Nanobioremediation of metal and salt contaminated soils. *In*: RAJPUT, Vishnu D.; KUMARI, Arpna; MINKINA, Tatiana M. (org.). **Nanobioremediation for water and soil treatment: An eco-friendly approach**. Government College University Faisalabad, Paquistão: Apple Academic Press, 2024. p. 259-290.

Sobre os Autores

Walace Daniel de Almeida Santos

E-mail: walacequimicauefs@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1478-7704>

Graduando em Química.

Endereço profissional: Av. Transnordestina, s/n, Feira de Santana, Novo Horizonte, BA. CEP: 44036-900.

Thalita Valesca Santana Freitas Oliveira

E-mail: thalitasantana95@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2679-7061>

Graduanda em Química.

Endereço profissional: Av. Transnordestina, s/n, Feira de Santana, Novo Horizonte, BA. CEP: 44036-900.

Ivanice Ferreira dos Santos

E-mail: ifsantos@uefs.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5088-3153>

Doutora em Química.

Endereço profissional: Av. Transnordestina, s/n, Feira de Santana, Novo Horizonte, BA. CEP: 44036-900.

Humbervânia R. Gonçalves da Silva

E-mail: humbervania@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5088-3153>

Doutora em Química.

Endereço profissional: Av. Transnordestina, s/n, Feira de Santana, Novo Horizonte, BA. CEP: 44036-900.