



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO TRÊS RIOS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO MEIO AMBIENTE - DCMA**

**PERSPECTIVAS FUTURAS DA FITORREMEDIAÇÃO: VANTAGENS
E DESVANTAGENS**

Isabella do Nascimento Oliveira

ORIENTADOR: Prof. Dr. Fabíola de Sampaio Rodrigues Grazinoli Garrido

**TRÊS RIOS - RJ
DEZEMBRO – 2024**



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO TRÊS RIOS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO MEIO AMBIENTE - DCMA**

**PERSPECTIVAS FUTURAS DA FITORREMEDIAÇÃO: VANTAGENS
E DESVANTAGENS**

Isabella do Nascimento Oliveira

Monografia apresentada ao curso de Gestão Ambiental, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Gestão Ambiental da UFRRJ, Instituto Três Rios da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

**TRÊS RIOS - RJ
DEZEMBRO-2024**

Oliveira, Isabela do Nascimento – 2024

Perspectivas Futuras da Fitorremediação: vantagens e desvantagens / Isabella do Nascimento Oliveira – 2024.

51f: grafs., tabs.

Orientadora: Fabíola de Sampaio Rodrigues Grazinoli Garrido.

Monografia (bacharelado) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto Três Rios.

Bibliografia: f. 46 – 51.

1. Metais Pesados - Remediação - Eficácia – Solos Contaminados - Biotécologia – Monografia I. Garrido, Fabíola de Sampaio Rodrigues Grazinoli. II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto Três Rios. III. Título

TRÊS RIOS - RJ

DEZEMBRO-2024



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO TRÊS RIOS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO MEIO AMBIENTE - DCMA**

**PERSPECTIVAS FUTURAS DA FITORREMEDIAÇÃO: VANTAGENS
E DESVANTAGENS**

Isabella do Nascimento Oliveira

Monografia apresentada ao curso de Gestão Ambiental, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Gestão Ambiental da UFRRJ, Instituto Três Rios da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Aprovada em 10/12/2024

Banca examinadora:

Prof. Orientador Dr. (a) Fabíola de Sampaio Rodrigues Grazinoli Garrido

Prof. Dr. Fábio Souto de Almeida

Prof. Me. Bárbara Oliveira de Moraes

**TRÊS RIOS - RJ
DEZEMBRO-2024**

“Dedico esse trabalho a Deus, minha família que sempre me apoiou e todos que contribuíram para que eu alcançasse meu objetivo.”

AGRADECIMENTOS

A todos os envolvidos que me ajudaram na realização desse trabalho: à minha mãe, Margarete; meu pai, Jeyson; e minha irmã, Rafaella, que me apoiaram e incentivaram para que eu não desistisse.

Meus amigos da universidade, Gustavo e Milena, que sempre me fizeram companhia e me ajudaram quando precisei.

À minha orientadora, Fabíola, pelo respaldo e conselhos.

RESUMO

Atividades antrópicas favoreceram o crescimento de grandes centros urbanos levando comodidade à população trazendo benefícios e novos desafios como a degradação e poluição ambiental que tem prejudicado o meio ambiente e a saúde humana. Tendo conhecimento que a fitorremediação é uma técnica biotecnológica que usa plantas para remover, transferir, estabilizar ou destruir contaminantes do solo, água e ar. Quando falamos de fitorremediação, podemos citar quatro formas de aplicar a fitorremediação, sendo elas: A fitoextração, fitoestabilização, fitodegradação e fitovolatilização que são ajustes aos mecanismos através das plantas empregadas na fitorremediação para limpar áreas contaminadas. Devido ao seu baixo custo, menor impacto ambiental e à possibilidade de recuperar áreas degradadas, a fitorremediação se torna uma solução tecnicamente viável. Somado a sua rentabilidade, aplicabilidade em larga escala, e possibilidade a reintrodução de alguns poluentes na cadeia produtiva, socialmente aceitável e que contribui para a ornamentação do ambiente, possuindo potencial de remediação de vários poluentes como metais pesados, pesticidas, solventes e hidrocarbonetos. Embora a fitorremediação tenha incontáveis vantagens, essa técnica pode ter obstáculos que impedem sua eficácia em determinados cenários, como sua dependência quanto ao ciclo de crescimento das plantas, melhor aplicabilidade nas camadas superficiais do solo, onde as raízes das plantas têm a capacidade de alcançar e absorver os contaminantes. A análise de artigos e trabalhos acadêmicos, utilizando como base de dados o CAPES, Google Acadêmicos e biblioteca Scielos, conduzindo pesquisas de acordo com parâmetros como: fitorremediação e espécies com potencial fitorremediador para distinguir a relevância dos estudos existentes no campo da fitorremediação demonstrou que a fitorremediação é um método promissor para remediar ambientes contaminados, apresentando vantagens significativas em comparação com métodos tradicionais de remediação química e física. Tal método é capaz de remover contaminantes, bem como hidrocarbonetos, metais pesados, pesticidas e solventes do solo. No entanto, a fitorremediação enfrenta problemas como a eficácia diminuída em camadas mais profundas do solo e o tempo necessário para a remediação completa, que pode variar de meses a anos. Além disso, foram identificados como limitações significativas a dependência de fatores climáticos e a necessidade de alta biodisponibilidade dos contaminantes.

Palavras-chave: metais pesados; remediação; eficácia; contaminação do solo; biotecnologia.

ABSTRACT

Anthropogenic activities have favored the growth of large urban centers, bringing convenience to the population, bringing benefits and new challenges such as environmental degradation and pollution that have harmed the environment and human health. Knowing that phytoremediation is a biotechnological technique that uses plants to remove, transfer, stabilize or destroy contaminants from soil, water and air. When we talk about phytoremediation, we can mention four ways of applying phytoremediation, namely: Phytoextraction, phytostabilization, phytodegradation and phytovolatilization, which are adjustments to the mechanisms through plants used in phytoremediation to clean contaminated areas. Due to its low cost, lower environmental impact and the possibility of recovering degraded areas, phytoremediation becomes a technically viable solution. In addition to its profitability, large-scale applicability, and the possibility of reintroducing some pollutants into the production chain, it is socially acceptable and contributes to the decoration of the environment, having the potential to remediate various pollutants such as heavy metals, pesticides, solvents and hydrocarbons. Although phytoremediation has countless advantages, this technique may have obstacles that prevent its effectiveness in certain scenarios, such as its dependence on the plant growth cycle, better applicability in the superficial layers of the soil, where plant roots have the ability to reach and absorb contaminants. Phytoremediation depends on the plants' growth cycle, which can vary from months to years and works best in the top layers of soil, where plant roots have the ability to reach and absorb contaminants. The efficiency of phytoremediation depends on the climate, soil type, availability of nutrients and other contaminants. The analysis of articles and academic works, using CAPES, Google Scholar and the Scielos library as a database, conducting research according to parameters such as: phytoremediation and species with phytoremediation potential to distinguish the relevance of existing studies in the field of phytoremediation demonstrated that the Phytoremediation is a promising method for remediating contaminated environments, presenting significant advantages compared to traditional chemical and physical remediation methods. However, phytoremediation faces problems such as decreased effectiveness in deeper soil layers and the time required for complete remediation, which can range from months to years. Furthermore, dependence on climatic factors and the need for high bioavailability of contaminants were identified as significant limitations.

Keywords: heavy metals; remediation; effectiveness; soil contamination; biotechnology.

LISTA DE ABREVIACOES E SMBOLOS

Ag – prata

As – arsênio

AVC - acidentes vasculares cerebrais

Cd – cádmio

Cobrac - Companhia Brasileira de Chumbo

Cr – cromo

Cr (III) - cromo trivalente

Cr (VI) - cromo hexavalente

Cs – césio

Cu – cobre

EROs - espécies reativas de oxignio

FONART - Fundo Mexicano para o Artesanato

HAPs - hidrocarbonetos aromáticos policíclicos

Hg – mercúrio

Mn – manganês

Mo – molibdnio

Ni – níquel

Ou – ouro

Pb – chumbo

Se – selnio

U – urânio

Zn - zinco

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fontes e sumidouros de metais pesados e contaminantes.....	15
Figura 2: Representação dos mecanismos da fitorremediação.....	34
Figura 3: Ilustração dos métodos de remediação física, química e biológica.....	35
Figura 4: Características necessárias em plantas energéticas para aplicabilidade na fitorremediação.....	41

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Principais metais poluentes do solo e os efeitos em humanos, plantas e microrganismos.....	17
Quadro 2: Artigos sobre fitorremediação, objetivos e metodologia.....	20
Quadro 3: Classificação da fitorremediação para diferentes contaminantes.....	35
Quadro 4: Espécies vegetais e suas vantagens e desvantagens para fitorremediação.....	42

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 POLUENTES E SUAS FORMAS DE DISPERSÃO.....	13
1.1.1 ESTRUTURA DO SOLO.....	13
1.1.2 FONTES DE POLUIÇÃO NO BRASIL.....	14
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	19
3 DESENVOLVIMENTO.....	19
3.1 FITOEXTRAÇÃO.....	28
3.2 FITOESTABILIZAÇÃO.....	29
3.3 FITODEGRADAÇÃO.....	30
3.4 FITOVOLATILIZAÇÃO.....	31
3.5 FUNDAMENTOS DA FITORREMEDIAÇÃO.....	33
3.6 CASOS DE CONTAMINAÇÃO POR POLUENTES.....	36
3.7 POLUENTES NO SOLO: CONSEQUÊNCIAS AMBIENTAIS E RISCOS À SAÚDE.....	37
3.8 ESTUDOS COMPROBATÓRIOS DA EFICIÊNCIA DA FITORREMEDIAÇÃO.....	40
3.9 DESVANTAGENS	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	45
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA.....	46

1 INTRODUÇÃO

Os avanços que moldam a estrutura mundial como é hoje trouxe benefícios e facilidade nas atividades cotidianas, no entanto introduziu novos desafios, em particular ao que se refere aos impactos ambientais. Em detrimento de tais impactos tem-se observado que o desequilíbrio dos serviços ecossistêmicos e o efeito sobre a saúde humana estão relacionados a degradação e poluição ambiental (Carvalho, 2023).

A crescente frequência de desastres ambientais resultados dos impactos ambientais demonstra a imperatividade na criação de métodos que remediem tais catástrofes. Nesse cenário, a fitorremediação foi um dos métodos desenvolvidos para descontaminar o meio ambiente. Segundo França et al. (2023), a fitorremediação é uma técnica em que as plantas são utilizadas para extrair, sequestrar ou desintoxicar o solo, água, sedimentos e ar contaminado.

A fitorremediação pode reduzir os danos ambientais causados pela contaminação, particularmente por metais pesados como cádmio, chumbo e cromo, isso ocorre porque as plantas removem ou estabilizam contaminantes no solo, água e ar, e ao absorver, acumular ou degradar esses poluentes. As plantas ajudam a reduzir a concentração de substâncias tóxicas no ambiente, reduzindo o risco de contaminação das águas subterrâneas e de propagação para as áreas adjacentes (Fernandes & Favani 2022).

Com os pontos acerca da fitorremediação e suas características pontuadas, o trabalho objetiva analisar a fitorremediação e seu potencial, se os benefícios apresentados quanto a sua aplicabilidade se transpõe aos pontos negativos.

A seguir será abordado como a fitorremediação atua na redução de danos ambientais, com foco em sua aplicação na remediação de metais pesados, além de destacar as formas de dispersão dos poluentes e a importância da estrutura do solo nesse processo.

1.1 POLUENTES E SUAS FORMAS DE DISPERSÃO

1.1.1 ESTRUTURA DO SOLO

A estrutura do solo é definida pelo arranjo e organização das partículas do solo em agregados, que servem para determinar a saúde, fertilidade e funcionalidade geral da biogeocenose do solo. A estabilidade e as características destes agregados são determinadas por múltiplos fatores, o que inclui o conteúdo de material orgânico, práticas de uso da terra e a biologia da atividade.

Os tópicos supracitados inferem diretamente sobre a aplicabilidade da fitorremediação, afetando a capacidade das plantas de acessar os contaminantes e de promover a remediação. A biodisponibilidade do contaminante no solo, por exemplo, determina quando do poluente vai estar disponível para que a planta possa remediá-lo.

De acordo com Liu et al., (2013) o aumento da matéria orgânica leva à formação de agregados estáveis que promovem uma estrutura do solo melhorada e mais resistente à erosão. Além disso, Liu et al., (2013) reitera também que as minhocas contribuem significativamente para o aumento da estabilidade dos agregados, tanto incorporando matéria orgânica ao solo quanto pela promoção da formação de solo pela escavação e alimentação. O tamanho das distribuições e a estabilidade dos agregados do solo são marcadores da qualidade do solo.

De acordo com Lepsch (2016) a formação de solos surge a partir do complexo das interações entre os constituintes orgânicos e as partículas primárias do solo. Adicionalmente, Wang et al. (2011) discorre sobre como a estabilidade dos agregados do solo é fundamental em várias funções do solo, como resistência à erosão e retenção de água. A relação entre tamanho e estabilidade do agregado é mais claramente discutida, uma vez que agregados maiores têm maior estabilidade e são necessários para manter a qualidade do solo.

Os fatores ambientais, incluindo a umidade e a temperatura, também desempenham um papel importante para a estabilidade dos agregados do solo. Por exemplo, segundo Xukai et al. (2020), os ciclos de umidade e de seca podem melhorar a estabilidade hídrica dos agregados do solo, especialmente no solo argiloso e siltoso.

Da mesma forma, DagesseDaryl (2013) discute como os ciclos de congelado e de degelo também têm um impacto sobre a estabilidade dos agregados do solo. Ele argumenta que esses ciclos podem alterar a intensidade e a coesão dos agregados do solo e podem afetar a estrutura do solo. Em suma, a estrutura do solo, definida pela estabilidade e tamanho da distribuição de agregados, é influenciada pelo conteúdo de matéria orgânica, atividade biológica, práticas de gestão do solo e condições ambientais.

Assim, para compreender plenamente o potencial e os desafios dessa abordagem, é fundamental identificar as principais fontes de poluição que afetam o solo, a água e o ar no contexto brasileiro, conforme demonstraremos a seguir.

1.1.2 FONTES DE POLUIÇÃO NO BRASIL

O Brasil enfrenta uma infinidade de fontes de poluição que impactam significativamente seu meio ambiente e saúde pública. As fontes mais comuns de poluição no Brasil incluem

emissões veiculares, escoamento agrícola, descargas industriais e queima de biomassa (Campos et al., 2021). Cada uma dessas fontes contribui para a poluição do ar, da água e do solo, representando desafios significativos para a gestão ambiental e a saúde pública.

Os problemas de poluição do ar no Brasil têm um grande impacto no meio ambiente e na saúde pública, pois há muitas fontes. Existem três tipos principais de poluição no Brasil — poluição do ar, poluição da água e contaminação do solo — as maiores fontes humanas decorrentes da atividade agrícola.

Consequentemente, o maior contribuinte para partículas em suspensão são as emissões de veículos e são responsáveis por uma parcela significativa da poluição do ar em áreas urbanas. Campos et al. dissertam que, no Brasil, o tráfego de veículos é responsável por cerca de 32% das emissões totais de material particulado fino e, portanto, é a principal fonte antropogênica de poluição do ar externo (Campos et al., 2021).

Isso é reforçado por Francischetti et al. (2014), que sustentam que os carros geram até 70% da poluição em grandes cidades como Rio de Janeiro e São Paulo. Além disso, a queima de biomassa em grandes áreas, principalmente na região amazônica, é um dos maiores contribuintes para a poluição do ar por meio de emissões de gases de efeito estufa e materiais particulados (Silva et al., 2014).

Poluentes podem estar presentes no ambiente em várias formas e podem se dispersar por diferentes meios, afetando, assim, em graus variados, a qualidade dos solos e a saúde dos ecossistemas. O conhecimento sobre os tipos de poluentes e suas possibilidades de dispersão é necessário para a proteção ambiental e o gerenciamento eficaz do solo e da remediação.

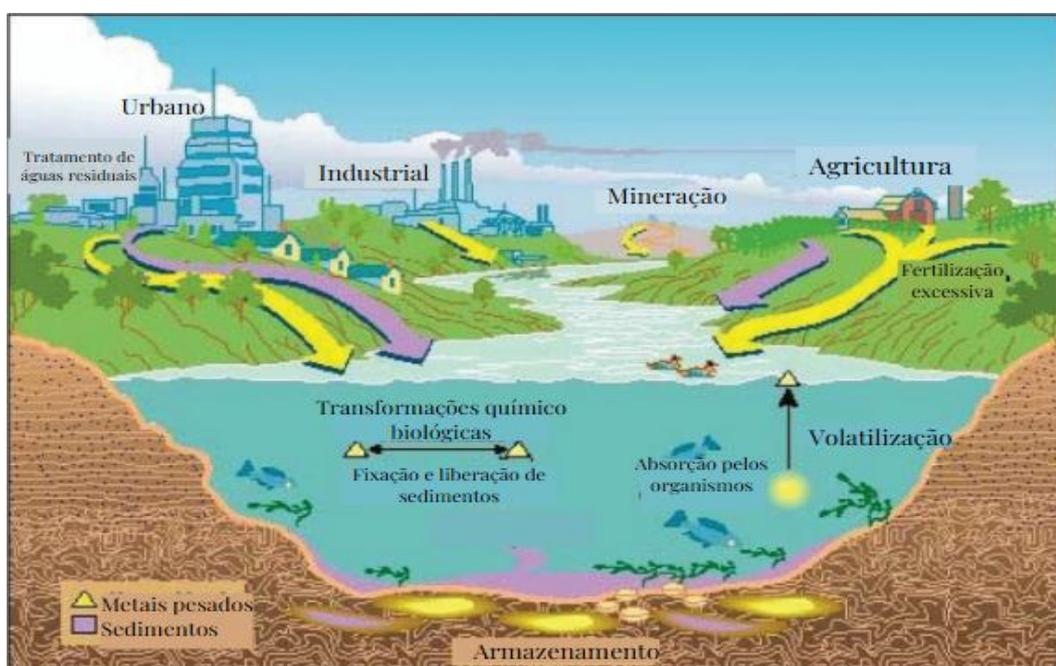


Figura 1: Fontes e sumidouros de metais pesados e contaminantes. Fonte: adaptado de Masindi & Muedi, 2019.

Um dos principais poluentes do solo é representado pelos metais pesados que são frequentemente associados a atividades industriais, à mineração ou ao escoamento urbano. Por exemplo, foi demonstrado que alguns metais pesados como chumbo (Pb) e cádmio (Cd) tendem a se acumular nos horizontes superiores dos solos, sendo sua dispersão influenciada pelas características do solo, como pH, teor de água, presença de carbonatos e outros (Masindi & Muedi, 2019). A dispersão desses metais pode ser realizada por meio de lixiviação quando a água da chuva ou irrigação transporta formas dissolvidas de metais para camadas mais profundas dos solos; uma vez nos aquíferos, eles têm um impacto na qualidade das águas potáveis (Figura 1) (Masindi & Muedi, 2019). Ao mesmo tempo, uma contribuição apreciável na mobilização de metais pesados vem de deposições atmosféricas, uma vez que poeiras e partículas contendo metais pesados podem ser transportadas por grandes distâncias antes de serem depositadas nos solos afetando negativamente o ser humano e o ambiente (Quadro 1/Figura1) (Masindi & Muedi, 2019).

Outro poluente emergente preocupante são os microplásticos, que têm sido cada vez mais detectados em solos agrícolas. Sua dispersão está associada principalmente às práticas agrícolas, como aplicação de biossólidos, composto e filmes de cobertura plástica. O destino dos microplásticos no solo é influenciado pelas propriedades do solo, como textura e atividades biológicas que podem afetar sua degradação e movimento dentro da matriz do solo (Kumar et al., 2020).

Poluentes orgânicos, como hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs), também são um tipo de substância tóxica que ameaça a saúde do ecossistema do solo, que entra no ambiente do solo de várias maneiras, como deposição atmosférica e processo de escoamento em locais contaminados (Holzbach, 2020).

A dispersão de poluentes também pode ser influenciada por fatores hidrológicos, como a permeabilidade do solo. Em solos de baixa permeabilidade, o movimento de poluentes macromoleculares orgânicos é limitado, retardando assim sua dispersão (Marinov & Marinov, 2014). Por outro lado, em solos de textura grossa com altas permeabilidades, os poluentes podem se mover mais rapidamente, levando a uma maior lixiviação e potencial poluição das águas subterrâneas (Marinov & Marinov, 2014).

Além dos processos físicos e químicos, os fatores biológicos também são importantes na dispersão de poluentes. A presença de microrganismos pode aumentar a degradação de

poluentes orgânicos e, portanto, sua distribuição e persistência no solo. No entanto, a biorremediação está sujeita a uma série de condições ambientais, como umidade do solo, pH e conteúdo de nutrientes para sua eficácia (Williams & Inweregbu, 2019).

Para resumir, os poluentes do solo podem ser vários (metais pesados, microplásticos, compostos orgânicos etc.) e ter diferentes formas de dispersão que são influenciadas por uma série de fatores ambientais. O conhecimento sobre esses processos é necessário para projetar estratégias adequadas de gerenciamento favorável ao solo e ao meio ambiente, bem como a remediação da poluição.

Quadro 1: Principais metais poluentes do solo e os efeitos em humanos, plantas e microrganismos. Fonte: Costa, 2019.

METAL	FONTE	EFEITO NO SER HUMANO	EFEITO EM PLANTAS	EFEITOS EM MICRORGANISMOS
Antimônio	Combustão de carvão, mineração, fundição, erosão do solo, erupção vulcânica.	Câncer, doenças cardiovasculares, conjuntivite, dermatite, doenças no fígado, ulceração nasal, doenças respiratórias	Diminui a síntese de alguns metabólitos, inibição do crescimento, inibe a síntese de clorofila.	Inibe as atividades enzimáticas, reduz a taxa de crescimento.
Arsênico	Deposição atmosférica, mineração, pesticidas, sedimentação de rochas, fundição.	Dano cerebral, distúrbios cardiovasculares e respiratórios, conjuntivite, dermatite, câncer de pele.	Membrana celular danosa, inibição do crescimento, inibição da expansão e proliferação das raízes, intervenção nos processos metabólicos críticos, perda de fertilidade e produção de frutos, estresse oxidativo, distúrbios fisiológicos.	Desativação de enzimas.
Berílio	Combustão de carvão e óleo, poeira vulcânica.	Reações alérgicas, berliose, câncer, doenças cardíacas, doenças pulmonares.	Inibe a germinação de sementes.	Aberração cromossômica, mutação.
Cádmio	Fertilizantes, mineração, pesticidas, plásticos, refino, soldagem.	Doença óssea, tosse, enfisema, cefaléia, hipertensão, itai-itai, doenças renais, câncer de pulmão e próstata, linfocitose, anemia hipocrômica microcítica, atrofia testicular, vômitos.	Clorose, diminui o teor de nutrientes das plantas, inibe o crescimento, reduz a germinação de sementes.	Danifica o ácido nucléico, desnatura a proteína, inibe a divisão celular e a transcrição, inibe a mineralização de carbono e nitrogênio.

Cromo	Tingimento, galvanoplastia, produção de tintas, fabricação de aço, bronzeamento, têxtil.	Broncopneumonia, bronquite crônica, diarreia, enfisema, cefaléia, irritação da pele, prurido do trato respiratório, doenças do fígado, câncer de pulmão, náusea, insuficiência renal, toxicidade reprodutiva, vômitos.	Clorose, atraso, senescência, murchamento, lesões bioquímicas, redução da germinação da biossíntese, crescimento atrofiado, estresse oxidativo.	Alongamento da fase de retardamento, inibição do crescimento, inibição do consumo de oxigênio.
Cobre	Polimento de cobre, mineração, pintura, chapeamento, operações de impressão.	Dor abdominal, anemia, diarreia, dor de cabeça, danos no fígado e rins, distúrbios metabólicos, náuseas, vômitos.	Clorose, estresse oxidativo, retardo do crescimento.	Interrupção da função celular, inibição das atividades enzimáticas.
Mercúrio	Baterias, combustão de carvão, atividades geotérmicas, mineração, indústrias de tintas, indústrias de papel, erupção vulcânica, intemperismo de rochas.	Déficit de atenção, cegueira, surdez, diminuição da taxa de fertilidade, demência, tontura, disfasia, irritação gastrointestinal, gengivite, problema renal, perda de memória, edema pulmonar, imunidade reduzida, esclerose.	Afeta o sistema antioxidante, afeta a fotossíntese, aumenta a peroxidação lipídica, indução do efeito genotóxico, inibição do crescimento das plantas, produção, absorção de nutrientes e a homeostase, o estresse oxidativo.	Diminuição do tamanho populacional, desnaturação da proteína, rompimento da membrana celular, inibição da enzima.
Níquel	Galvanoplastia, metais não ferrosos, tintas, esmaltagem de porcelana.	Doenças cardiovasculares, dor no peito, dermatite, tontura, tosse seca e falta de ar, dor de cabeça, doenças renais, câncer de pulmão e nasal, náusea.	Diminuição do conteúdo de clorofila, inibição das atividades enzimáticas e o crescimento, redução da absorção de nutrientes.	Interrupção da membrana celular, inibição das atividades enzimáticas, estresse oxidativo.
Selênio	Combustão de carvão, mineração.	Disfunção do sistema endócrino, distúrbios gastrointestinais, comprometimento da atividade das células natural killer, dano hepático.	Alteração das propriedades proteicas, redução da biomassa vegetal.	Inibição da taxa de crescimento.
Prata	Fabricação de baterias, processamento fotográfico, fundição, mineração.	Argyria e argirose, bronquite, efeitos citopatológicos em fibroblastos e queratinócitos, enfisema, atadura de cartilagem, fadiga mental, irritação no nariz, garganta e peito, reumatismo.	Afeta a homeostase, diminui o conteúdo de clorofila, inibe o crescimento.	Lise celular, inibição da transdução celular e o crescimento.

Tendo conhecimento que a fitorremediação é uma técnica biotecnológica que usa plantas para remover, transferir, estabilizar ou destruir contaminantes do solo, água e ar. Tem-

se ciência que é sustentável e ecologicamente correto e se tornou uma ótima opção como uma alternativa viável e menos agressiva em comparação aos outros métodos tradicionais de remediação, que na maioria das vezes envolvem processos químicos ou físicos que podem ter custos altíssimos e prejudiciais ao meio ambiente.

A fitorremediação só foi legitimada nas últimas décadas, devido a todo desenvolvimento da tecnologia e crescimento desenfreado que traz tantos benefícios quanto problemas para os seres humanos. Sendo assim, a busca por sustentabilidade impulsionou a pesquisa e a prática da fitorremediação em várias partes do mundo e é aplicada em diversas situações, mas destacam-se em áreas degradadas, em áreas industriais, terrenos agrícolas contaminados. Uma de suas vantagens é o baixo custo, sustentabilidade, melhoria estética das áreas remediadas e a possibilidade de recuperar metais valiosos a partir das plantas utilizadas no processo.

A fitorremediação surgiu como uma alternativa promissora, utilizando plantas para extrair, estabilizar ou degradar poluentes do solo (Fernandes & Favani 2022). As plantas têm a capacidade de absorver contaminantes do solo e modelá-los, estabilizando a fertilidade do solo e recuperando áreas poluídas (Ali et al., 2013; DalCorso et al., 2019). Além de ser economicamente viável e ambientalmente amigável, a fitorremediação pode prevenir a erosão e lixiviação de metais, melhorar a fertilidade do solo e ser aplicada em larga escala (Mejía et al., 2014).

Nos próximos tópicos, serão explorados os fundamentos da fitorremediação e seus mecanismos específicos, como fitoextração, fitoestabilização, fitodegradação e fitovolatilização, bem como estudos de caso que demonstram sua eficiência e as limitações que ainda precisam ser superadas para sua aplicação em larga escala.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia do presente trabalho consiste na revisão bibliográfica voltada para estudos previamente publicados sobre fitorremediação. A apuração e análise de artigos e monografias, utilizando como base de dados o CAPES, Google Acadêmicos e biblioteca Scielos. As pesquisas foram conduzidas de acordo com parâmetros como: fitorremediação e espécies com potencial fitorremediador para distinguir a relevância dos estudos existentes no campo da fitorremediação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Quando falamos de fitorremediação, podemos citar quatro formas de aplicar a fitorremediação, sendo elas: A fitoextração, fitoestabilização, fitodegradação e fitovolatilização que são ajustes aos mecanismos através das plantas empregadas na fitorremediação para limpar áreas contaminadas. Relativamente ao tratamento químico e à escavação, a fitorremediação é considerada uma alternativa sustentável e prática para a limpeza de ambientes contaminados, conforme afirma Mejía et al., 2014

Devido ao seu baixo custo, menor impacto ambiental e à possibilidade de recuperar áreas degradadas, a fitorremediação se torna uma solução tecnicamente viável, dessa forma estudos como os conduzidos por Morita & Moreno (2022) destacam que a fitorremediação, ao longo da descontaminação do ambiente, pode contribuir para a melhoria da qualidade do solo e da água, encorajando a biodiversidade e a restauração de habitats naturais. Somado a sua rentabilidade, aplicabilidade em larga escala, e possibilidade a reintrodução de alguns poluentes na cadeia produtiva, socialmente aceitável e que contribui para a ornamentação do ambiente, possuindo potencial de remediação de vários poluentes como metais pesados, pesticidas, solventes e hidrocarbonetos (Silva et al., 2023).

O uso de técnicas de fitorremediação representa um passo significativo na direção de práticas ambientais mais sustentáveis, visto o crescimento das atividades industriais e agrícolas que afetam a dispersão de contaminantes.

Em virtude de tais fatos estudos sobre a fitorremediação vem tomando impulso nos últimos anos, não só identificando como buscando formas de aprimorar a capacidade de remediação das mais diversas espécies. Concedendo ao mundo científico as mais variadas pesquisas em busca da expansão da área e no desenvolvimento de soluções mais inovadoras (Quadro 2).

Quadro 2: Artigos sobre fitorremediação, objetivos e metodologia. Fonte: produzido pelo autor, 2024.

TÍTULO	OBJETIVO GERAL	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	METODOLOGIA
---------------	-----------------------	------------------------------	--------------------

<p>Abscissic acid improves the phytoremediation ability of the aquatic accumulator plant <i>Nasturtium officinale</i> R. Br. in cadmium-contaminated soil./O ácido abscísico melhora a capacidade de fitorremediação da planta aquática acumuladora <i>Nasturtium officinale</i> R. Br. em solo contaminado com cádmio. Autores: Xuemei P et al. (2024)</p>	<p>Comprovar a hipótese de que se o ácido abscísico - ABA for aplicado em <i>Nasturtium officinale</i>, sua capacidade na fitorremediação de Cd pode ser melhorada.</p>	<p>Cultivo consorciado, enxertia, descarte de palhas nos campos e aplicação de hormônios vegetais.</p>	<p>Foram transferidas 3kg das amostras de solo para um vaso plástico de 25 cm x 10 cm (diâmetro x altura) e tratadas com o Cd (na forma de CdCl₂·2,5H₂O) e regado para manter a profundidade da água 2–3 cm acima da superfície do solo. A concentração final total de Cd no solo foi de 5 mg/kg. Depois disso, os vasos foram colocados em um dossel e o solo do vaso foi alagado por um mês. Três estacas uniformes de <i>N. officinale</i> foram plantados em cada vaso a uma profundidade de 5 cm no solo tratado com Cd. Os vasos foram regados para manter a profundidade da água 2–3 cm acima do solo e 20 µmol/L de ABA foram pulverizados nas folhas (ambos os lados) das mudas das plantas até que a solução começasse a pingar. Cada vaso foi pulverizado com 25 mL de ABA solução. Diferentes concentrações de ABA foram pulverizadas novamente uma semana depois da primeira pulverização para fortalecer o ABA. Cada tratamento foi realizado em triplicatas (três potes). Os vasos foram regados diariamente para manter a lâmina de água 5 cm acima da superfície do solo.</p>
<p>Fitorremediação em solo contaminado pelo metal chumbo. Autores: Schottz BS, et al. (2023)</p>	<p>Monitorar a regressão do metal chumbo em solos plantados com o capim vetiver.</p>	<p>Avalia o desempenho do capim vetiver (<i>Vetiveria zizanioides</i>) como fitorremediador de chumbo em solos da região Amazônica.</p>	<p>O experimento foi realizado em triplicata, com 20 vasos de solo contaminado com chumbo, e a planta foi cultivada por 4 meses. As amostras de solo foram analisadas por difração de raios X, fluorescência de raios-X, microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de infravermelho.</p>
<p>Study on Application of Phytoremediation Technology in Management and Remediation of Contaminated Soils./Estudo sobre Aplicação da Tecnologia de Fitorremediação no Manejo e Remediação de Solos Contaminados. Autores: Oh K, et al. (2014)</p>	<p>Desenvolvimento de um sistema de fitorremediação lucrativo, promovendo a aplicação prática da fitorremediação em solos contaminados e encontrando plantas e micróbios de remediação mais eficientes.</p>	<p>Desenvolver um sistema rentável de fitorremediação onde os proprietários de locais contaminados possam obter renda enquanto conduzem a fitorremediação.</p>	<p>O estudo revisa os mecanismos e processos de fitorremediação, incluindo fitoextração, fitoestabilização, fitodegradação, fitovolatilização, rizofiltração e rizodegradação. Os métodos utilizados no estudo incluem experimentos em vasos, experimentos de campo e inoculação de micróbios (<i>Hiratake</i>) em culturas (trigo e cevada).</p>

<p>Strategies and prospects in the recovery of contaminated soils by phytoremediation: an updated overview./ Estratégias e perspectivas na recuperação de solos contaminados por fitorremediação: um panorama atualizado. Autores: Silva J, et al. (2023)</p>	<p>Os objetivos do estudo são avaliar os mecanismos de fitorremediação no tratamento de áreas contaminadas, comparar a fitorremediação com técnicas convencionais e demonstrar as barreiras socioeconômicas na aplicação da fitorremediação.</p>	<p>Avaliar os benefícios da fitorremediação, sendo eles: baixo custo operacional, alta aceitação pela comunidade, fácil operação, técnica sustentável, aplicável a grandes áreas contaminadas, prevenção de erosão, prevenção de lixiviação e prevenção da propagação de substâncias tóxicas para áreas vizinhas.</p>	<p>O estudo utiliza uma revisão de literatura para avaliar os mecanismos de fitorremediação, compará-los com técnicas convencionais e identificar as barreiras socioeconômicas na aplicação da fitorremediação. O estudo utiliza uma revisão de literatura para avaliar os mecanismos de fitorremediação, compará-los com técnicas convencionais e identificar as barreiras socioeconômicas na aplicação da fitorremediação. O estudo analisa várias técnicas de fitorremediação, incluindo fitoextração, fitoestabilização e fitovolatilização, e discute a seleção de espécies de plantas, nutrientes e níveis de água para uma remediação ideal. O estudo analisa várias técnicas de fitorremediação, incluindo fitoextração, fitoestabilização e fitovolatilização, e discute a seleção de espécies de plantas, nutrientes e níveis de água para uma remediação ideal. Vários métodos têm sido empregados na fitorremediação, incluindo fitoextração, fitoestimulação e fitovolatilização, com diferentes espécies e técnicas de plantas sendo utilizadas.</p>
<p>Bioremediation an eco-friendly method for administration of environmental contaminants/Biorremediação, um método ecologicamente correto para administração de contaminantes ambientais. Autores: Muttaleb WH, Ali ZH (2022)</p>	<p>O objetivo desta revisão é fornecer uma visão completa dos diversos tipos de agentes de biorremediação, técnicas, vantagens, desvantagens e limitações, bem como auxiliar na seleção de produtos de biorremediação.</p>	<p>Fornecer uma visão completa dos numerosos tipos de agentes de biorremediação disponíveis, as diferentes técnicas de biorremediação, suas vantagens e desvantagens, bem como restrições no tratamento de contaminantes no ambiente natural.</p>	<p>A revisão discute várias técnicas de biorremediação, incluindo biorremediação ex-situ e in-situ, bioaumento, bioventing, biosparging, biocompostagem, biopilhas e biorreatores. Os métodos de fitorremediação incluem fitoextração, rizofiltração e fitotransformação, que utilizam plantas e microrganismos para remover poluentes de locais contaminados. Os métodos de biorremediação incluem técnicas in situ e ex situ, como bioestimulação, bioaumento, bioslurping e bioventing, bem como fitorremediação, rizorremediação e microrremediação.</p>

<p>Phytoremediation Potential of Fast-Growing Energy Plants: Challenges and Perspectives – a Review. Potencial de fitorremediação de usinas energéticas de rápido crescimento: desafios e perspectivas – uma revisão. Autores: Hauptvogel M, et al. (2020)</p>	<p>Explorar o potencial de fitorremediação de usinas energéticas de rápido crescimento, vinculando abordagens de remediação ecologicamente corretas e economicamente menos exigentes com a produção de energia sustentável local.</p>	<p>Concentra-se no potencial de fitorremediação de Salix, Populus, Miscanthus e Arundo, culturas energéticas cultivadas principalmente para produção de biomassa. O artigo também aborda as vantagens e desvantagens das tecnologias de fitorremediação e discute a necessidade de pesquisa interdisciplinar e envolvimento das partes interessadas para implementar práticas de fitorremediação com sucesso.</p>	<p>O estudo envolve uma revisão do potencial de fitorremediação das plantas energéticas, incluindo suas características de crescimento, produção de biomassa e capacidade de acumular substâncias tóxicas. Fitorremediação utilizando diversas espécies de plantas, incluindo salgueiros, choupos, Arundo donax e Miscanthus spp. Ferramentas de engenharia genética e "ômicas" para melhorar as habilidades de fitorremediação das plantas. Envolvimento das partes interessadas no estabelecimento de plantações de energia e processos de remediação. Utilização de ferramentas de sistema de informação geográfica (GIS) para obtenção e processamento de dados sobre adequação de plantas e características ambientais. O estudo envolve uma revisão das pesquisas existentes sobre o uso de Arundo donax e Miscanthus para fitorremediação e produção de energia.</p>
<p>Phytoremediation and Plant-Assisted Bioremediation in Soil and Treatment Wetlands: A Review./Fitorremediação e Biorremediação Assistida por Plantas em Solos e Áreas Úmidas de Tratamento: Uma Revisão. Autores: Truu J, et al (2015)</p>	<p>Revisar brevemente os processos básicos de fitorremediação com ênfase especial na rizorremediação e nas interações planta-micróbio na biotransformação assistida por plantas de poluentes orgânicos e inorgânicos no solo.</p>	<p>Revisar processos básicos de fitorremediação com ênfase especial na rizorremediação e nas interações planta-micróbio na biotransformação assistida por plantas de poluentes orgânicos e inorgânicos no solo. Além disso, são abordados o potencial e os desafios da estratégia de fitorremediação para uma melhor remoção de poluentes orgânicos e inorgânicos da água em zonas húmidas de tratamento.</p>	<p>A revisão abrange os processos básicos de fitorremediação, incluindo absorção, translocação, transformação, compartimentação e, às vezes, mineralização de poluentes pelas plantas. O estudo revisa o uso da fitorremediação, incluindo o uso de bactérias endofíticas, para tratar contaminantes orgânicos e inorgânicos no solo e em águas poluídas.</p>

<p>Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils./Fitoextração de metais e metalóides de solos contaminados. Autores: McGrath S, Zhao FJ (2003)</p>	<p>O objetivo é otimizar a fitoextração através da compreensão das características e mecanismos envolvidos na hiperacumulação.</p>	<p>Obter bons rendimentos de biomassa e hiperacumulação de metal para tornar o processo eficiente. Investigar os mecanismos responsáveis pela hiperacumulação, utilizando hiperacumuladores naturais como espécies vegetais modelo. A fim de obter uma compreensão mais fundamental das características e mecanismos envolvidos na hiperacumulação para que a fitoextração possa ser otimizada.</p>	<p>A adição de agentes quelantes ao solo para aumentar a biodisponibilidade de contaminantes tem sido tentada para induzir hiperacumulação em plantas normais.</p>
<p>Phytoextraction of toxic metals./Fitoextração de metais tóxicos. Autor: Lasat MM (2002)</p>	<p>O objetivo da revisão é avaliar o status atual da implantação da tecnologia de fitorremediação e sugerir direções futuras de pesquisas.</p>	<p>Concentra-se nos desafios da remediação de locais contaminados com metais tóxicos e explora a fitorremediação como uma solução potencial. O artigo revisa quatro áreas de pesquisa relevantes para a fitoextração de metais de solo contaminado.</p>	<p>A revisão é baseada em uma análise abrangente das pesquisas existentes no campo da fitorremediação.</p>
<p>Fitorremediação de solos contaminados com herbicidas. Autores: Pires FR, et al. (2003)</p>	<p>Identificar espécies de plantas que reúnem características desejáveis para fitorremediação de herbicidas.</p>	<p>Descrever o potencial do uso da fitorremediação para remover herbicidas de solo contaminado.</p>	<p>Estudo de caso de fitorremediação em solos contaminados por herbicidas; análise de espécies vegetais tolerantes a herbicidas; avaliação da capacidade de metabolização de agrotóxicos em plantas; análise de espécies de plantas aparentemente persistentes em áreas de cultivo de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo; revisão de literatura sobre fitorremediação de compostos orgânicos e agrotóxicos.</p>

<p>Inferências sobre atividade rizosférica de espécies com potencial para fitorremediação do herbicida tebuthiuron. Autores: Pires FR, et al. (2005)</p>	<p>Avaliar a atividade rizosférica de quatro espécies vegetais com potencial para fitorremediação de tebuthiuron.</p>	<p>Avalia a atividade rizosférica de quatro espécies de plantas com potencial fitorremediador para o tebuthiuron e inferir sobre a contribuição das raízes no processo de descontaminação deste herbicida.</p>	<p>Análise da respiração microbiana como índice da atividade microbiana rizosférica; Utilização de um fatorial 5 x 2 x 4 (quatro espécies + uma testemunha não rizosférica; duas doses do herbicida tebuthiuron, e quatro épocas de avaliação); Utilização de um fatorial 5 x 2 x 4 (quatro espécies + uma testemunha não rizosférica; duas doses do herbicida tebuthiuron, e quatro épocas de avaliação); Aplicação de tebuthiuron em diferentes doses (0,73 µg g⁻¹ e 40 µg g⁻¹) em solo rizosférico de quatro espécies de plantas (feijão-de-porco, mucuna-preta, mucuna-anã e milho); Avaliação da taxa de evolução de CO₂ em diferentes épocas de avaliação (1, 2, 3, 10 e 55 dias após a aplicação do tebuthiuron).</p>
<p>Suscetibilidade de espécies de plantas com potencial de fitorremediação do herbicida sulfentrazone. Autores: Maladão JC, et al. (2013)</p>	<p>Selecionar espécies de plantas com potencial para a fitorremediação do herbicida sulfentrazone.</p>	<p>Selecionar espécies com potencial para fitorremediação de solos contaminados com o herbicida sulfentrazone.</p>	<p>Experimento em casa de vegetação com oito espécies de plantas e cinco doses do sulfentrazone (0, 200, 400, 800 e 1.600 g ha⁻¹). Avaliação da fitotoxicidade do herbicida, altura de plantas e massa de matéria seca da parte aérea e de raízes.</p>
<p>Fitorremediação: uma proposta de descontaminação do solo. Autores: Vasconcellos MC, et al. (2012)</p>	<p>Avaliar a efetividade da fitorremediação em degradar contaminantes orgânicos no solo.</p>	<p>Informa sobre o campo da fitorremediação e sua utilização no tratamento de metais pesados.</p>	<p>Uso de plantas para degradar contaminantes orgânicos no solo; Uso de plantas para degradar contaminantes orgânicos no solo; Análise da efetividade da fitorremediação em diferentes condições; Estudo da associação entre microrganismos e plantas na degradação de compostos orgânicos.</p>
<p>Potencial de quatro espécies herbáceas forrageiras para fitorremediação de solo contaminado por arsênio. Autores: Melo RF, et al. (2009)</p>	<p>Avaliar o potencial de quatro espécies herbáceas forrageiras para fitorremediação de solos contaminados por arsênio.</p>	<p>A pesquisa tem como objetivo avaliar o potencial de quatro espécies herbáceas forrageiras: townsville stylo (<i>Stylosanthes humilis</i> HBK), amendoim forrageiro (<i>Arachis pintoi</i> Krapov. & Gregory), aveia (<i>Avena strigosa</i> Schreb) e azevém (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.) para fitorremediação de solos contaminados com arsênio.</p>	<p>Incubação de amostras de solo com diferentes doses de arsênio; Sementação e adubação das espécies estudadas; Avaliação da altura, matéria seca e teor de arsênio nas plantas; Cultivo de plantas em solo contaminado com diferentes doses de As; Análise da produção de matéria seca e altura de plantas; Determinação do teor de As nas diferentes partes das plantas e solo; Utilização de técnicas de espectrometria de emissão atômica com plasma induzido em argônio (ICP/AES) para análise do teor de As; Análise do conteúdo de As nas raízes e parte aérea das plantas; Determinação do índice de translocação de As para a parte aérea das plantas.</p>

<p>Fitorremediação: plantas como agente de despoluição. Autores: Lamego FP, Vidal RA (2007)</p>	<p>Revisar os aspectos da fitorremediação e a possibilidade de sua aplicação para a descontaminação de áreas poluídas causadas por atividades humanas.</p>	<p>O objetivo desta revisão foi discutir a fitorremediação, suas aplicações na limpeza de áreas poluídas pela atividade humana e a possibilidade de sua utilização prática.</p>	<p>Análise de estudos de caso sobre a aplicação da fitorremediação em diferentes países; Discussão sobre os processos fisiológicos envolvidos na fitorremediação; Estudo de caso de fitorremediação de urânio, selênio e mercúrio; Análise de plantas hiperacumuladoras para remover poluentes do solo; Uso de biotecnologia para criar plantas mais eficientes para fitorremediação; Discussão de vários aspectos da fitorremediação, como métodos, processos fisiológicos envolvidos, propriedades de plantas utilizadas e relação com a biotecnologia.</p>
<p>Fitorremediação de solo salino sódico por <i>Atriplex nummularia</i> e gesso de jazida. Autores: Leal IG, et al. (2008)</p>	<p>Avaliar o potencial de <i>Atriplex nummularia</i> como planta fitoextratora de Na do solo em condições de irrigação com águas de diferentes níveis de salinidade.</p>	<p>Constatar se <i>Atriplex nummularia</i> se comporta como planta hiperacumuladora de sódio, com potencial para uso na fitorremediação desse elemento no solo. Analisar o uso do gesso para promover aumento na capacidade de extração de sódio do solo pela planta, podendo ser utilizado como potencializador de fitorremediação.</p>	<p>Experimento em casa de vegetação com <i>Atriplex nummularia</i> e gesso; Irrigação com águas de diferentes níveis de salinidade; Análise de teores de Na na planta e no solo; Coleta de plantas e solo; Análise de Na por fotometria de chama; Análise de variância pelo teste de F e comparação das médias pelo teste de Tukey.</p>
<p>Fitorremediação de solo contaminado com picloram por capim-pé-de-galinha-gigante (<i>Eleusine coracana</i>). Autores: Procópio SO, et al. (2008)</p>	<p>Avaliar a influência da densidade populacional de capim-pé-de-galinha-gigante (<i>Eleusine coracana</i>) sobre a fitorremediação de solo contaminado com o herbicida picloram.</p>	<p>Avaliar a influência da densidade populacional do capim-colchão gigante (<i>Eleusine coracana</i>) na fitorremediação de solo contaminado com o herbicida picloram.</p>	<p>Experimento realizado em casa de vegetação com 12 tratamentos, combinando quatro densidades populacionais da espécie vegetal <i>Eleusine coracana</i> e três doses do picloram; Análise de variância e teste de Tukey a 5% para comparar as médias dos efeitos significativos das doses do picloram em cada densidade populacional; Cultivo prévio de <i>Eleusine coracana</i> em solo contaminado com picloram; Avaliação da fitotoxicidade, altura e biomassa de plantas de soja semeada em sucessão; Análise da influência da densidade populacional de <i>Eleusine coracana</i> na fitorremediação do solo.</p>

<p>Seleção de plantas com potencial para fitorremediação de solos contaminados com o herbicida trifloxysulfuron sodium. Autores: Procópio SO, et al. (2004)</p>	<p>Selecionar espécies vegetais tolerantes ao trifloxysulfuron sodium para programas de fitorremediação de solos contaminados com este herbicida.</p>	<p>Identificar plantas tolerantes ao herbicida trifloxysulfuron sódico, visando utilizá-las em programas de fitorremediação.</p>	<p>Experimento em vasos com dez espécies de plantas, utilizando um delineamento de blocos casualizados em parcelas subdivididas com três repetições; Avaliação da altura das plantas, sintomas de toxicidade e biomassa seca da parte aérea, raízes e total das plantas; Experimento com 10 espécies vegetais e doses variadas do herbicida trifloxysulfuron sodium; Avaliação dos sintomas de toxicidade e biomassa seca das plantas.</p>
<p>Uso de leguminosas na fitorremediação de solo contaminado com sulfentrazone. Autores: Madalão JC, et al. (2012)</p>	<p>Avaliar o potencial remediador de quatro espécies de leguminosas para fitorremediação de solos contaminados com sulfentrazone.</p>	<p>O estudo teve como objetivo avaliar o potencial de quatro espécies, <i>Crotalaria juncea</i>, <i>Canavalia ensiformis</i>, <i>Cajanus cajan</i> e <i>Cajanus cajan</i> (anão), para remediação de solo contaminado com sulfentrazone, utilizando milheto (<i>Pennisetum glaucum</i>) como planta bioindicadora.</p>	<p>Experimento em casa-de-vegetação com quatro espécies de leguminosas e quatro doses de sulfentrazone; Avaliação da altura das plantas, biomassa fresca e seca da parte aérea e fitotoxicidade visual de <i>Pennisetum glaucum</i>; Cultivo de quatro espécies vegetais (<i>C. juncea</i>, <i>C. cajan</i>, <i>C. ensiformis</i> e <i>Arachis hypogaea</i>) em solos contaminados com sulfentrazone; Avaliação da altura e biomassa fresca e seca de <i>P. glaucum</i> cultivadas em sucessão às espécies avaliadas; Experimentos em laboratório e campo para avaliar a capacidade de fitorremediação de plantas; Análise da persistência de herbicidas em solos.</p>

Nota-se no quadro acima que há dos mais diversos estudos relacionados a espécies com potencial fitorremediador e a possível descontaminação de poluentes orgânicos e inorgânicos. Podemos observar a pesquisa de título: Fitorremediação em solo contaminado pelo metal chumbo, desenvolvida por Schottz et al., (2023), que estuda a capacidade do *Vetiver (Vetiveria zizanioides)* em fitoextrair o metal chumbo.

A fitoextração é um dos quatro métodos fitorremediador em que a planta extrai o contaminante em seus tecidos, nos próximos tópicos os métodos serão abordados com mais detalhes. Quanto ao chumbo, segundo o CEVS – Centro Estadual de Vigilância em Saúde está presente em atividades como fabricação de PVC e em materiais de revestimentos em baterias. O chumbo tem efeito no sistema nervoso e rins como: encefalopatia crônica, neuropatia periférica, nefropatia com gota e insuficiência renal crônica, podendo levar à morte. Pode-se apresentar o caso na região de Santo Amaro – Bahia contaminada por chumbo, esse e outros casos serão tratados no tópico 3.6.

3.1 FITOEXTRAÇÃO

A fitoextração é um método de fitorremediação promissor para remover contaminantes metálicos do solo e da água, as plantas são usadas nessa técnica para absorver, translocar e acumular metais pesados nas partes aéreas, como folhas e caules, isso permite que os contaminantes sejam removidos do ambiente de forma sustentável e ecologicamente adequada. A eficácia do processo depende da capacidade da planta de transportar os metais na rizosfera, a área do solo próxima às raízes, onde as mesmas excretam substâncias orgânicas que ajudam na solubilização dos metais (Faveni & Fernandes, 2022).

Após a absorção, os metais são transferidos para as partes aéreas da planta através do sistema vascular, conhecido como xilema, para sua eficiência, a translocação eficaz determina a quantidade de metal que pode ser acumulada nas folhas e caules.

Segundo Fernandes & Faveni (2022), os metais se acumulam principalmente nas partes aéreas, que podem ser coletadas e retiradas do ambiente, as plantas que são usadas na fitoextração são conhecidas como "plantas hiperacumuladoras" devido à sua capacidade de acumular concentrações extremamente altas de metais pesados sem causar nenhum impacto fitotóxico significativo. Devido a tal característica, as plantas hiperacumuladoras, como *Brassica juncea* (mostarda indiana), *Thlaspi caerulescens* e *Pteris vittata*, são frequentemente utilizadas para a fitoextração.

Essas plantas são capazes de resistir a altos níveis de contaminantes, mas ainda podem crescer e se desenvolver normalmente. A fitoextração funciona melhor em solos onde os metais estão solúveis, pois as raízes podem absorvê-los melhor, a acidificação do solo ou a adição de quelantes podem aumentar a disponibilidade de metais, melhorando a eficiência da fitoextração (Faveni & Fernandes, 2022).

Plantas que crescem rapidamente e produzem muita biomassa são ideais para fitoextração porque podem acumular mais metais em um período mais curto, assim a quantidade total de metais retirados do solo também pode aumentar como resultado de várias colheitas ao longo do tempo. A mesma tem sido usada em vários contextos ambientais, em áreas industriais ou próximas a minas, onde o solo está contaminado com metais como chumbo, cádmio e zinco, ela pode ser usada para remover esses contaminantes com o tempo, diminuindo a toxicidade e melhorando a qualidade do solo (Faveni & Fernandes, 2022).

A fitoextração pode ajudar na recuperação de áreas degradadas em locais onde os rejeitos de metais pesados se acumulam, permitindo a revegetação e o retorno da biodiversidade ao ambiente.

A fitoextração pode ser usada para limpar o solo antes de ser reutilizada para o cultivo em locais onde o uso excessivo de pesticidas e fertilizantes contaminou o solo, isso ajuda a promover práticas agrícolas mais sustentáveis. É uma técnica promissora, mas tem limitações, pois se trata de um processo lento e pode levar anos ou até décadas para remover grandes quantidades de metais pesados do solo, especialmente em locais altamente contaminados (Mejía et al., 2014).

Para evitar a contaminação do ambiente, as plantas que acumulam metais pesados devem ser recolhidas e descartadas de forma segura, o gerenciamento dessa biomassa contaminada é uma tarefa que requer logística e técnica.

A eficiência da fitoextração pode ser limitada por fatores ambientais, como condições climáticas, tipo de solo e presença de outros contaminantes, que podem afetar o crescimento da espécie e a absorção de metais.

3.2 FITOESTABILIZAÇÃO

Quanto a fitoestabilização, seu objetivo se revela por sua nomenclatura, estabilizar e conter contaminantes no solo, principalmente metais pesados e compostos orgânicos, para evitar sua mobilização e dispersão para o meio ambiente circundante. A mesma não remove os contaminantes do solo, mas os torna menos biodisponíveis, como resultado, é menos prejudicial à saúde humana e ao ambiente (Mejía et al. 2014).

Segundo Mejía et al. (2014), plantas usadas para a fitoestabilização devem ter características específicas, como tolerância a altos níveis de metais pesados, crescimento rápido e extensos sistemas radiculares. A eficácia da fitoestabilização depende de vários fatores que influenciam a capacidade das plantas de estabilizar os contaminantes, devido à sua capacidade de crescer em solos contaminados e estabilizar o solo, plantas como *Populus* spp. (choupos), *Salix* spp. (salgueiros) e *Vetiveria zizanioides* (vetiver) são frequentemente utilizadas.

Conforme Morita & Moreno (2022), os fatores que influenciam a fitoestabilização podem ser pH, textura e matéria orgânica do solo. Os solos com alto teor de argila e matéria orgânica tendem a reter metais pesados, o que facilita a imobilização dos contaminantes, os microrganismos do solo também podem ajudar na fitoestabilização, precipitando metais e transformando contaminantes em formas menos tóxicas, pois a eficácia da fitoestabilização pode ser melhorada pela simbiose entre plantas e microrganismos, como micorrizas.

A fitoestabilização tem sido utilizada para conter metais pesados em áreas industriais em vários cenários ambientais. Em locais contaminados por atividades industriais, como

fundições e refinarias, ela pode ser utilizada para conter metais pesados no solo, evitando que se espalhem para áreas residenciais ou corpos d'água adjacentes, e em áreas mineradoras, onde há grandes quantidades de rejeitos contendo metais pesados, a fitoestabilização pode ser utilizada para conter tais compostos (Mejía et al. (2014).

Como a fitoestabilização apenas estabiliza os contaminantes em vez de removê-los, os riscos associados à contaminação permanecem em longo prazo, o que significa que é necessário um monitoramento contínuo. Alguns elementos como clima, tipo de solo e presença de outros elementos podem afetar a eficiência da fitoestabilização, o que pode limitar sua aplicabilidade em certos ambientes.

A fitoestabilização é um método útil para lidar com solos contaminados, especialmente quando a remoção total dos contaminantes não é viável, pois essa técnica pode proteger a saúde humana de maneira sustentável, ao imobilizar e estabilizar contaminantes por meio da utilização de plantas. No entanto, para obter resultados mais amplos, a fitoestabilização deve ser levada em consideração sendo combinada com outros métodos de remediação.

3.3 FITODEGRADAÇÃO

Um outro método que pode ser aplicado dentro da fitorremediação é a fitodegradação, que é uma técnica em que as plantas são usadas para degradar, transformar ou mineralizar contaminantes orgânicos encontrados no solo, na água ou no ar. Essa técnica é particularmente eficaz na eliminação de contaminantes orgânicos persistentes, como pesticidas, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, solventes clorados e outros.

Segundo Mejía et al. (2014), fitodegradação ocorre por vários mecanismos que envolvem plantas e microrganismos relacionados; várias enzimas, como peroxidases, oxidorreduções e hidrolases, são secretadas pelas raízes e folhagens das plantas e têm a capacidade de oxidar, reduzir ou hidrolisar contaminantes orgânicos, transformando-os em compostos menos tóxicos.

Ao excretar destilados radiculares, que alimentam os microrganismos, as plantas aumentam sua capacidade de destruição, além disso, alguns microrganismos têm enzimas que podem metabolizar compostos que as plantas sozinhas não conseguem, e em alguns casos, as plantas podem absorver contaminantes voláteis e liberá-los para a atmosfera por meio da transpiração. Isso é especialmente importante para substâncias voláteis, como solventes clorados, que podem ser extraídos do solo ou da água e liberados como gases menos perigosos (Holzbach et al., 2020).

A fitodegradação funciona bem dependendo de uma variedade de fatores que podem afetar a capacidade das plantas e dos microrganismos de degradar os contaminantes. A escolha das plantas é fundamental para o sucesso da fitodegradação, devido ao seu sistema radicular extenso e à produção de enzimas degradativas, espécies vegetais como *Populus* spp. (choupos), *Salix* spp. (salgueiros) e *Cynodon dactylon* (capim bermuda) são conhecidas por suas habilidades de degradação.

A suscetibilidade do contaminante à degradação é influenciada por sua estrutura química, temperatura, pH do solo, disponibilidade de nutrientes e presença de oxigênio, afetando a atividade enzimática das plantas e dos microrganismos, e a taxa com que os contaminantes são degradados.

Conforme Holzbach et al. (2020) fitodegradação tem sido usada com sucesso em várias situações de contaminação ambiental, uma delas é a contaminação do solo por pesticidas excessivos nas áreas agrícolas, a fitodegradação pode decompor esses compostos em produtos menos tóxicos, permitindo a recuperação do solo para uso agrícola seguro. Também pode ser usada em zonas úmidas construídas, onde as plantas aquáticas ajudam a degradar contaminantes orgânicos na água, melhorando a qualidade da água antes de ser liberada em corpos d'água naturais.

Em locais industriais onde solventes clorados e outros compostos orgânicos persistentes estão presentes, a fitodegradação pode ser usada para reduzir a toxicidade e o impacto ambiental desses contaminantes, isso favorece muitos benefícios pois é uma técnica natural e ecológica e ajuda a restaurar o ambiente sem usar produtos químicos ou escavações muito profundas.

A fitodegradação geralmente é mais barata do que métodos de remediação convencionais, especialmente em áreas grandes contaminadas. Contudo há limitações, pois a fitodegradação é um processo lento, especialmente em solos ou águas com alta concentração de contaminantes ou onde os contaminantes são quimicamente complexos, a fitodegradação também pode ser prejudicada por temperaturas extremas, seca ou solos com baixa fertilidade (Morita & Moreno, 2022).

3.4 FITOVOLATILIZAÇÃO

Abordando outro método temos a fitovolatilização, que é um processo de fitorremediação em que as plantas absorvem contaminantes do solo ou da água e os transformam em compostos voláteis, e depois disso, o processo de transpiração libera esses contaminantes na atmosfera. A remoção de metais e compostos orgânicos voláteis de ambientes

contaminados, é um mecanismo especialmente útil porque é uma abordagem inovadora e sustentável para a limpeza ambiental (Amado & Filho, 2015).

Como as raízes das plantas absorvem contaminantes do solo ou da água, um dos vários passos cruciais do processo de fitovolatilização é a absorção de contaminantes e a sua solubilidade. Assim como disponibilidade de tais compostos no ambiente determina o curso desse processo, alguns dos contaminantes mais comuns associados à fitovolatilização incluem metais como mercúrio (Hg) e selênio (Se), bem como alguns compostos orgânicos voláteis (Da Silva et al., 2016).

De acordo com Amado & Filho (2015), após serem absorvidos pelas raízes, os contaminantes são transportados através do xilema para a parte aérea das plantas, este movimento é impulsionado pelo fluxo transpiracional da planta, que transporta a água e os nutrientes junto com os contaminantes para as folhas e outras partes acima do solo, depois de chegar à parte aérea, os contaminantes podem ser transformados em formas voláteis por processos metabólicos na planta.

A planta libera os compostos voláteis que produz, isso pode reduzir a concentração de contaminantes no solo ou na água, remediando efetivamente o ambiente contaminado. No entanto, a transferência desses contaminantes para a atmosfera levanta dúvidas sobre sua propagação em escalas geográficas maiores, embora normalmente na forma de compostos menos tóxicos (Amado & Filho, 2015).

Como observado acima, a fitovolatilização tem sido principalmente estudada em metais como mercúrio e selênio, mas também pode ocorrer com compostos orgânicos voláteis. Vários fatores afetam a eficiência da fitovolatilização, incluindo a volatilidade intrínseca do contaminante, que é muito importante porque as plantas liberam contaminantes altamente voláteis com mais facilidade (Da Silva et al., 2016).

Outros fatores, como temperatura, umidade relativa e velocidade do vento, afetam a taxa de transpiração das plantas e, portanto, a volatilização dos contaminantes.

Os benefícios da fitovolatilização incluem a remediação *in situ*, que permite a remediação dos contaminantes diretamente no local afetado sem a necessidade de remoção do solo; é geralmente menos caro do que métodos convencionais de remediação, e é sustentável, pois a utilização de plantas na remediação é uma abordagem ecológica e sustentável que promove a restauração do ambiente natural (Mejía et al., 2014).

Embora os contaminantes volatilizados sejam normalmente menos tóxicos, há preocupações sobre como eles se dispersam na atmosfera e podem afetar áreas distantes. Como

a fitovolatilização funciona melhor para contaminantes altamente voláteis, outras técnicas de fitorremediação podem ser mais adequadas para compostos com baixa volatilidade ou alta toxicidade (Mejía et al., 2014).

3.5 FUNDAMENTOS DA FITORREMEDIAÇÃO

Quando cientistas começaram a explorar o potencial das plantas para descontaminar ambientes poluídos no final do século XX, a fitorremediação surgiu como técnica de remediação ambiental, como o estudo de Mejía et al. (2014), que examinou a capacidade das plantas de absorver metais pesados do solo. A ideia de usar plantas para a remediação, desencadeou vários estudos mostrando o quão eficazes as plantas são em acumular, decompor e estabilizar poluentes em vários ambientes.

De acordo com Mejía et al. (2014), a fitorremediação consiste na aplicação de microrganismos associados em plantas verdes para estabilizar ou diminuir a contaminação em solos, águas e sedimentos. Durante as décadas passadas, o estudo foi destacado por causa da poluição industrial e agrícola e da pesquisa de métodos de remediação mais sustentáveis e ecológicos.

Como supracitado nos tópicos anteriores, existem várias abordagens de fitorremediação, cada uma utilizando diferentes mecanismos biológicos e fisiológicos das plantas, entre elas apresentam-se: a fitoextração, fitoestabilização, fitodegradação, fitovolatilização (Figura 2/Quadro 3). Sintetizando-os:

A fitoextração envolve uma aquisição de contaminantes pelo sistema radicular das plantas e sua translocação para partes aéreas, como folhas e caules, onde os contaminantes se acumulam, um grande exemplo de fitoextração é o *Thlaspi caerulescens*, que é conhecido por sua capacidade de acumular metais pesados em concentrações elevadas (Garzón et al., 2017), o processo de fitoextração é eficaz na remoção de metais pesados como chumbo, cádmio e zinco do solo.

Já a fitoestabilização é a maneira de imobilizar contaminantes no solo, evitando sua dispersão pelo ar ou sua migração para águas subterrâneas (Mejía et al., 2014). As raízes das plantas secretam destilados que precipitam os metais, reduzindo sua mobilidade e biodisponibilidade, dessa forma, a *Festuca arundinacea* é um excelente modelo de fitoestabilização.

A fitodegradação refere-se à degradação de contaminantes orgânicos pelas enzimas produzidas pelas plantas, o uso de plantas como o girassol (*Helianthus annuus*) para degradar

Direta	Fitoextração	Inorgânico	Ag, Cd, Cr, Cs, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Pu, U, Zn
	Fitovolatilização	Orgânico	Hidrocarbonetos, pentaclorofenóis, policlorobifenilos, tricloroetileno
	Fitotransformação	Inorgânico	Se e Hg
Indireta	Fitovolatilização	Inorgânico	As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb e Zn
		Orgânico	Hidrocarbonetos, pentaclorofenóis, policlorobifenilos, tricloroetileno
	Fitoestimulação		

Os mecanismos de ação da fitorremediação são diversos e complexos, envolvendo interações bioquímicas e fisiológicas entre as plantas e os contaminantes. As plantas absorvem contaminantes através de suas raízes e os acumulam em seus tecidos, particularmente nas folhas e caules, sendo assim as enzimas vegetais provocam uma transformação menos tóxica ou mais degradável dos contaminantes orgânicos, enquadrado como imobilização biológica.

Já na imobilização química e física, as raízes das plantas têm a capacidade de imobilizar contaminantes no solo, prevenindo sua lixiviação e diminuindo sua biodisponibilidade (Figura 3).

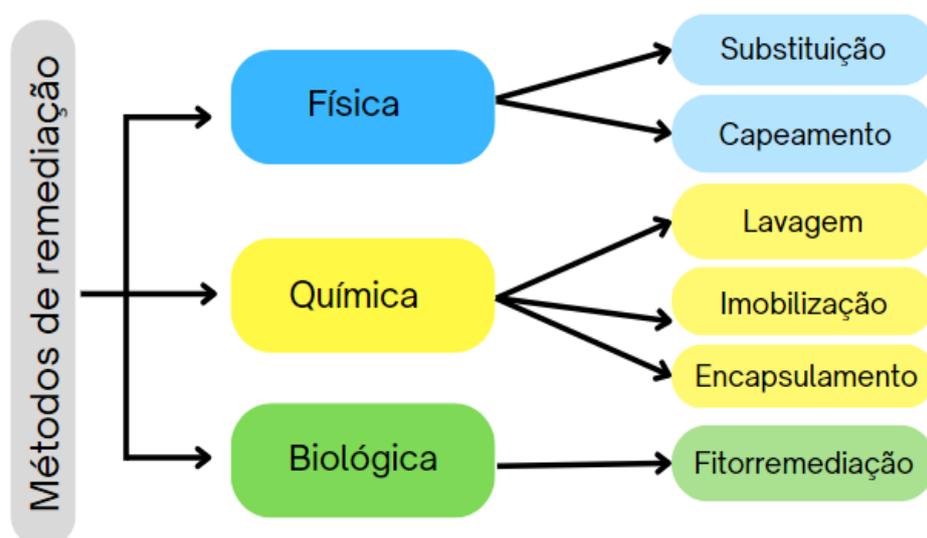


Figura 3: Ilustração dos métodos de remediação física, química e biológica. Fonte: adaptado de Silva et al., 2023.

A plantação pode volatilizar contaminantes por absorvê-los e transformá-los em formas voláteis que são liberadas para a atmosfera.

3.6 CASOS DE CONTAMINAÇÃO POR POLUENTES

Como retratado nos temas supracitados, o desenvolvimento acarretou no aumento de compostos no ecossistema, como também na introdução de novos elementos, afetando o ambiente e a sociedade. No decorrer do desenvolvimento das cidades e comunidades casos de contaminação por poluentes como metais pesados e agrotóxicos foram sendo retratados.

Andrade et al. (2013) discorre sobre o caso de contaminação por chumbo ocorrido em Santo Amaro- Bahia, onde a Companhia Brasileira de Chumbo - Cobrac foi responsável pela contaminação da população, solo, água e animais. Estudos realizados encontraram altas concentrações não apenas de chumbo, mas também de cádmio afetando o sistema renal, pulmões, ossos, causando convulsões, cefaleia, alucinações e mais.

A Cobrac fechou no início da década de 90, no entanto a população e o ecossistema da região sofrem até hoje com o ocorrido.

Pesquisas realizadas por Padula et al. (2005) relatam que na região de Bauru - São Paulo em decorrência de dejetos com sal de óxido de chumbo e sulfato de chumbo presentes na poeira (pluma) e a deposição de chumbo metálico no solo provenientes da empresa produtora de baterias Ajax a população e o ambiente fronteiro com a companhia foi contaminada por cobre. A empresa abriu falência em 2015, mas até hoje há pessoas que convivem com os efeitos da contaminação.

O boletim epidemiológico emitido em 9 de outubro de 2023 pelo Ministério da Saúde relata que entre os anos de 2013 a meados de 2022 foram relatados cerca de 124.295 casos de intoxicação exógena por agrotóxicos em todo o Brasil. Destes, 47,42% das notificações foram de causas não intencionais por exposição aos agrotóxicos de uso agrícola.

Estudos elaborados por Cipro et al. (2017) identificou contaminação por metais pesados em animais marinhos e aves provenientes das Ilhas Kerguelen. A pesquisa indica que além das fontes naturais há também metais consequentes do despejo de poluentes por fábricas localizadas na região indicando a contaminação de petréis pardela-preta (*Procellaria aequinoctialis*) por cobre, selênio e zinco; *Themisto gaudichaudii*, um crustáceo, apresentou concentrações de cádmio muito maiores às concentrações de inúmeras espécies de peixes.

Análises realizadas por Tamaio-Ortiz & Navia-Antezana (2018) revelam os esforços para diminuir a contaminação por chumbo em comunidades rurais no México, segundo os

autores a contaminação se dá pela prática tradicional da produção de cerâmicas esmaltadas por um pó denominado greta que contém monóxido de chumbo. Os esforços descritos na pesquisa estão no desenvolvimento de maneiras mais seguras para que essas comunidades que dependem da produção da cerâmica para subsistência possam manter seus lares sem que afetem sua saúde e de suas famílias, conscientizando-as sobre o perigo do uso da greta e mostrando formas mais seguras para evitar e/ou diminuir a exposição ao metal. Embora ainda haja diversas famílias que trabalham e dependem da greta para seu sustento, e como cita os autores “a agência governamental mexicana Fondo Nacional para el Fomento de las Artesanías, FONART (Fundo Mexicano para o Artesanato) vem implementando programas em todo o México para retirar esmaltes à base de chumbo desde o início da década de 90. Contudo, a mudança para esmaltes sem chumbo não envolve apenas seu uso, mas outros fatores que incluem: um forno melhor que pode atingir temperaturas uniformes, remediação das oficinas e um mercado para cerâmicas sem chumbo”.

3.7 POLUENTES NO SOLO: CONSEQUÊNCIAS AMBIENTAIS E RISCOS À SAÚDE

O chumbo (Pb) é um metal pesado que é naturalmente encontrado em nosso meio ambiente, mas por influência de atividades antrópicas se encontra em grandes concentrações, níveis esses que são imanejáveis. Isso pode ser encontrado na mineração, fundição, fabricação de baterias, tintas e queima de combustíveis fósseis. Sua fixação no solo e alta toxicidade colocam em risco a saúde humana e o ecossistema (BIBLIOTECA..., 2022).

A contaminação do solo por chumbo ocorre principalmente em locais onde resíduos industriais são descartados inadequadamente, bem como em áreas industriais próximas a rodovias. Como o metal não é degradado por processos biológicos, ele pode permanecer no solo por um longo período de tempo.

A quantidade de chumbo presente no solo tem um impacto negativo na qualidade do solo, na saúde das plantas e na cadeia alimentar, podendo causar anemia, doenças renais e danos ao sistema nervoso em humanos e animais, o chumbo impede que as plantas absorvam nutrientes, prejudicando seu crescimento e desenvolvimento (BIBLIOTECA..., 2022).

De acordo com Biblioteca... (2022), outros efeitos da toxicidade por chumbo são: clorose, necrose, fotossíntese reduzida e até mesmo morte das plantas em altas concentrações, além disso, o chumbo tende a se acumular nas raízes das plantas, impedindo-o de se espalhar. No entanto, se a vegetação contaminada for consumida por animais ou seres humanos, ainda pode ser perigoso para a saúde.

O chumbo é neurotóxico e pode afetar o desenvolvimento do sistema nervoso, especialmente nas crianças, a exposição ao chumbo pode causar problemas cognitivos, problemas de aprendizado, problemas de concentração e comportamento agressivo (BIBLIOTECA..., 2022).

O metal também aumenta a pressão arterial e aumenta o risco de doenças cardíacas e acidentes vasculares cerebrais (AVC), além de interferir na produção de hemoglobina, uma proteína que transporta oxigênio no sangue, a exposição ao mesmo também pode causar anemia. Também pode resultar em danos renais, levando à insuficiência renal em casos graves; em adultos, o chumbo pode causar infertilidade, abortos espontâneos e problemas no desenvolvimento do feto durante a gravidez (BIBLIOTECA..., 2022).

O chumbo também pode enfraquecer o sistema imunológico, tornando o corpo mais suscetível a doenças e infecções. Além disso, também pode interferir no funcionamento hormonal, causando distúrbios endócrinos que afetam o crescimento, o desenvolvimento e o metabolismo.

Conforme Johnson (2023), o cromo (Cr) é um metal pesado que pode ser extremamente tóxico para o meio ambiente e para a saúde humana, dependendo do estado de oxidação do metal. O cromo trivalente [Cr (III)], que é menos tóxico, e o cromo hexavalente [Cr (VI)], que é altamente tóxico e se dissolve facilmente em água, são as duas formas mais comuns encontradas no solo.

A presença de cromo no solo, particularmente na forma hexavalente, é um problema significativo para o meio ambiente. O mesmo é principalmente produzido em atividades industriais como curtumes, galvanoplastia e fabricação de corantes e pigmentos. O Cr (VI) pode contaminar as águas potáveis e colocar em risco a saúde quando está presente no solo devido à sua alta solubilidade.

A microbiota pode ser prejudicada pelo cromo presente no solo, diminuindo a diversidade microbiana e afetando a decomposição da matéria orgânica. Por sua vez, isso prejudica o crescimento das plantas e a fertilidade do solo. A absorção do metal pelas plantas em altas concentrações pode causar toxicidade, como clorose, necrose foliar e redução da taxa de crescimento (Johnson, 2023).

De acordo com Johnson (2023), a exposição ao cromo, especialmente ao cromo hexavalente, pode causar problemas significativos para a saúde humana. A irritação do trato gastrointestinal, as úlceras e o dano aos rins e fígado são algumas das consequências de consumir alimentos ou água contaminados com Cr (VI). Além disso, como o Cr (VI) é um

carcinógeno humano conhecido, a inalação de poeira contendo o metal está associada a um maior risco de câncer de pulmão.

A capacidade do cromo de produzir espécies reativas de oxigênio (EROs) dentro das células aumenta a toxicidade do cromo. Esses EROs podem causar estresse oxidativo, danos ao DNA e apoptose celular, assim, a presença de cromo no ambiente é um grande problema de saúde pública, especialmente em locais próximos a fontes industriais de poluição (Johnson, 2023).

Segundo Fernandes et al., cádmio (Cd), um metal pesado altamente tóxico e pode ser encontrado em diversos lugares, incluindo mineração, fundição, fabricação de baterias e uso de fertilizantes fosfatados. O cádmio presente no solo representa uma ameaça significativa à saúde humana e ao meio ambiente.

A quantidade de cádmio presente no solo pode alterar a qualidade do mesmo e prejudicar a saúde das plantas, devido à sua baixa mobilidade em ambientes ácidos, o cádmio tende a se acumular na superfície do solo, mas as plantas podem absorvê-lo, entrando na cadeia alimentar (Fernandes et al.).

Segundo Fernandes et al., as consequências da toxicidade do cádmio para as plantas incluem a inibição da fotossíntese, clorose, necrose e, em casos extremos, a morte da planta. Além disso, o cádmio tem o potencial de alterar a forma como a microbiota do solo é estruturada, o que pode prejudicar processos biogeoquímicos essenciais como a decomposição da matéria orgânica e a ciclagem de nutrientes.

A exposição ao cádmio é principalmente causada pela ingestão de alimentos contaminados e pela inalação de fumaça ou poeira contendo o composto. Os vegetais cultivados em solos contaminados com cádmio têm a capacidade de acumular quantidades significativas de metal, colocando a saúde humana em risco significativo (Fernandes et al.).

A disfunção renal é um dos efeitos mais graves da exposição ao cádmio. Ao longo do tempo, o cádmio se acumula nos rins, causando danos renais prolongados e perda da função tubular renal. Além disso, devido à interferência do cádmio no metabolismo do cálcio e na formação óssea, a exposição prolongada ao cádmio está associada a doenças ósseas como a osteomalácia e a osteoporose (Fernandes et al.).

A inalação de partículas de cádmio está fortemente associada ao câncer de pulmão, e o cádmio também é conhecido como um carcinógeno humano. Hipertensão, doenças cardiovasculares e danos nocivos ao sistema reprodutivo e imunológico são outras complicações de saúde.

3.8 ESTUDOS COMPROBATÓRIOS DA EFICIÊNCIA DA FITORREMEDIAÇÃO

Segundo Larson & Sims (2003) estudos realizados indicam que plantas aquáticas como: *Ceratophyllum demersum*, *Elodea canadensis* e *Lemna minor* tem capacidade de acelerar a biotransformação e remoção dos herbicidas metolachlor e atrazine da água onde, mais da metade do metolachlor foi removida do sistema. No entanto, a capacidade de fitorremediação do atrazine foi menor sendo o *C. demersum* a única espécie capaz de remover ao menos 50% do contaminante.

Estudos realizados por Schottz et al. (2023) mostrou que a espécie *Vetiveria zizanioides* (capim Vetiver) foi capaz de fitoextrair cerca de 50% da contaminação por cobre no solo, o capim Vetiver apresentou alta taxa de crescimento e fácil adaptação ao ecossistema brasileiro.

Costa (2019) mostrou em sua pesquisa que estudos realizados por Mesa et al. (2017) sobre o potencial de bactérias nacionais resistentes a arsênico facilitando a fitorremediação do mesmo pela espécie *Betula celtiberica* comprovando que a relação entre as bactérias e plantas no solo são imperativas para o aprimoramento da absorção do arsênico. Demonstrou também novidades quanto às contribuições das rizobactérias, consolidando a teoria de que a recuperação de bactérias associadas a espécies resistentes a metais adaptadas a uma região historicamente contaminada e seu uso em técnicas de bioaugmentação é uma visão experimental cabível e com potencial para a elaboração de estratégias eficientes de fitorremediação com plantas e suas bactérias.

Segundo Martins (2015) a espécie *Helianthus annuus* (Girassol) é uma opção promissora na fitorremediação de solos multicontaminados por hidrocarboneto e metais pesados com capacidade de acumular os contaminantes tanto em suas raízes quanto em seus tecidos.

O estudo feito por Oliveira (2022) demonstrou que as espécies *Sedum sediforme* e *Panicum virgatum* em potencial em fitorremediar metais pesados como: chumbo (Pb), cobre (Cu), zinco (Zn) e cromo (Cr), sendo a *S. sediforme* com maior potencial fitorremediador embora com menor produção de biomassa indicando baixa produção de bioenergia. Já *P. virgatum* tem menor potencial fitorremediador a mesma possui alta produção de biomassa e consequentemente alta produção bioenergética.

3.9 DESVANTAGENS

Embora a fitorremediação tenha incontáveis vantagens, essa técnica pode ter obstáculos que impedem sua eficácia em determinados cenários. Avaliar seu atual potencial e procurar soluções que mitiguem suas fraquezas requerem compreender tais obstáculos.

A fitorremediação leva muito tempo para alcançar níveis significativos de descontaminação, o que é uma das principais desvantagens. Outro ponto a se ressaltar é a necessidade de pesquisar espécies nativas brasileiras com potencial fitorremediador, visto que espécies exóticas podem conferir problemas a biodiversidade nativa.

A fitorremediação depende do ciclo de crescimento das plantas, que pode variar de meses a anos, em contraste com técnicas químicas ou físicas que podem ser implementadas rapidamente. A velocidade de crescimento e a capacidade de acumulação das espécies vegetais usadas têm um impacto direto na taxa de remediação (Petersen et al., 2023) (Quadro 4).

A fitorremediação funciona melhor nas camadas superficiais do solo, onde as raízes das plantas têm a capacidade de alcançar e absorver os contaminantes. A contaminação em camadas mais profundas é um grande desafio, pois as raízes da maioria das plantas não conseguem penetrar o suficiente para acessar os poluentes, como afirmado por Morita & Moreno (2022), a eficiência da fitorremediação diminui significativamente com a profundidade do solo contaminado, como resultado, é menos eficaz para remediar locais com contaminação grave.

A eficiência da fitorremediação depende do clima, do tipo de solo, da disponibilidade de nutrientes e de outros contaminantes (Figura 4).

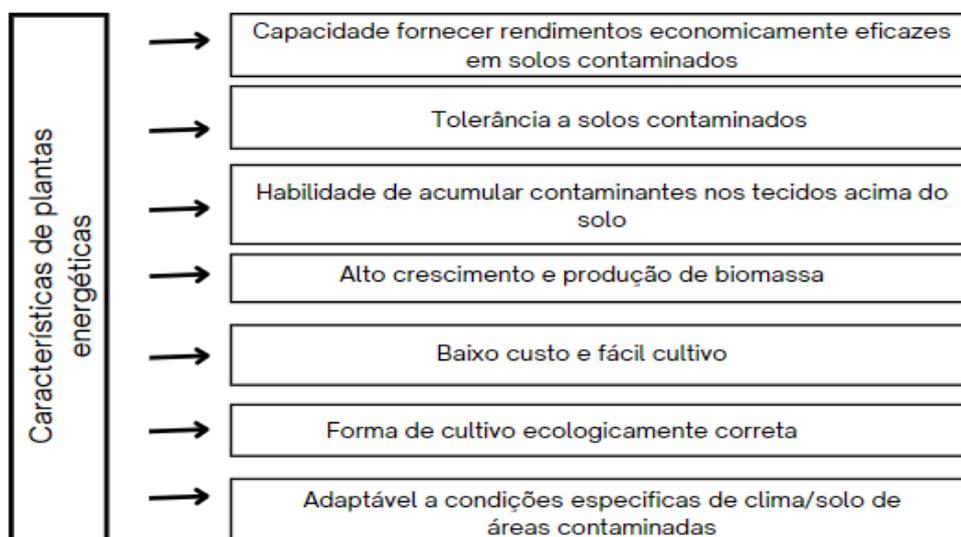


Figura 4: Características necessárias em plantas energéticas para aplicabilidade na fitorremediação. Adaptado de Hauptvogel et al., 2018.

As plantas usadas no processo precisam apresentar resistência a mudanças climáticas, mas ainda podem não sobreviver em ambientes perigosos, como secas prolongadas ou solos altamente ácidos (Petersen et al., 2023). Além disso, altas concentrações de contaminantes podem ser perigosas para as plantas, prejudicando seu crescimento e capacidade de recuperação.

O grau de biodisponibilidade dos contaminantes presentes no solo é outro importante fator que influencia a eficiência da fitorremediação.

A única substância que pode ser extraída do solo são os contaminantes que as raízes das plantas podem absorver, os contaminantes e suas interações com o solo podem alterar a biodisponibilidade.

Por exemplo, as plantas não podem acessar metais pesados em formas insolúveis ou que estão fortemente ligados a partículas do solo (Mejía et al., 2014). Além disso, o uso de agentes quelantes para aumentar a biodisponibilidade dos metais pode causar danos ao meio ambiente. Um desses efeitos seria a lixiviação dos metais nas águas subterrâneas (Mejía et al., 2014).

Outro ponto negativo é o risco de transferência de contaminantes acumulados para a cadeia alimentar. Os herbívoros podem consumir plantas hiperacumuladoras, o que resulta na biomagnificação dos contaminantes em toda a cadeia trófica (Silva et al., 2019). Além disso, a remoção da biomassa contaminada requer cuidados especiais de disposição para evitar que os contaminantes sejam reintroduzidos no ambiente.

Quadro 4: Espécies vegetais e suas vantagens e desvantagens para fitorremediação. Produzido pelo ator.

NOME	POLUENTE	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Ricinus communis (mamoeira)	Pesticidas organoclorados	Alta capacidade de bioacumulação/aplicação em grandes áreas/ baixa manutenção/ possibilita tratamento in situ/	Possui ricina, um componente tóxico que exige monitoramento e impossibilita a aplicação em área em que há risco de exposição

Helianthus annuus (girassol)	Hidrocarbonetos e metais pesados	Capacidade de hiperacumulação/rápido crescimento e produção de biomassa/resistência a certos contaminantes/promove assistência a microbiota	Limitações a certos componentes/ diminuição no potencial de remediação sob altas concentrações de contaminantes
Solanum lycopersicum (tomate)	Metais pesados	Alta absorção de cobre	Limitações na remediações de outros metais/ a presença desses outros metais podem inibir atividades enzimáticas dificultando o processo de fitorremediação/vulnerabilidade a insetos e condições adversas
Zea mays (milho)	Metais pesados	Capacidade de bioacumulação principalmente de chumbo e zinco/resistência a diversas condições ambientais	Remediação lenta/limitações em grandes concentrações de contaminantes
Linum usitatissimum (linhaça)	Metais pesados	Capacidade de acumular metais	Limitações a certos metais

Cyperus glomeratus (junças)	Drenagens de minas	Capacidade de acumular contaminantes como nitrogênio e fósforo/ resistente a ambientes salinos/adaptabilidade a zonas alagadas/sistema de raízes fibrosas que ajudam a manter o solo	Limitações a certos metais/riscos de contaminação secundária por bioacumulação nos tecidos se não houver manejo/inibição do processo de fitorremediação frente a grandes concentrações de metais/sensibilidade a estresses climáticos
--------------------------------------------	--------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Em suma, a análise dos estudos revisados mostrou que a fitorremediação é um método que engloba um portfólio grande de espécies com potencial de remediação, assim como os impactos que os contaminantes têm sobre a saúde humana e o meio ambiente, os casos ocorridos no Brasil e em outros países afetados por poluentes. Se mostrou uma metodologia promissora para remediar ambientes contaminados, apresentando vantagens significativas em comparação com métodos tradicionais de remediação química e física. Tal método é capaz de remover contaminantes de várias plantas, bem como hidrocarbonetos, metais pesados, pesticidas e solventes do solo. Por exemplo, a capacidade de *Thlaspi caerulescens* de acumular metais pesados em concentrações elevadas é um fator que o destaca (Garzón et al., 2017).

A fitorremediação usa uma variedade de mecanismos, incluindo fitoextração, fitoestabilização, fitodegradação e fitovolatilização. Cada um desses mecanismos funciona para uma variedade de contaminantes e condições ambientais. Por exemplo, pesquisas mostram que a fitoextração pode remover metais pesados como zinco, cádmio, chumbo e outros.

Sua sustentabilidade e baixo custo de suas técnicas resultam em baixo custo operacional e melhorias estéticas e ambientais nas áreas remediadas. Uma outra vantagem é a capacidade de extrair metais preciosos das plantas utilizadas no processo.

No entanto, a fitorremediação enfrenta problemas como a eficácia diminuída em camadas mais profundas do solo e o tempo necessário para a remediação completa, que pode variar de meses a anos. Além disso, foram identificados como limitações significativas a dependência de fatores climáticos e a necessidade de alta biodisponibilidade dos contaminantes.

Embora a fitorremediação seja vista como uma coisa boa para o meio ambiente, ela também pode trazer riscos, como a biomagnificação de contaminantes na cadeia alimentar e a necessidade de cuidados especiais para realocar a biomassa contaminada.

A fitorremediação é vista como uma estratégia viável e promissora para a remediação de solos e águas contaminadas. Oferecendo uma alternativa de baixo custo e sustentável aos métodos tradicionais, a fitorremediação é uma opção viável. As plantas usadas no processo são capazes de absorver, estabilizar e degradar uma variedade de contaminantes. Isso ajuda a restaurar áreas degradadas e melhorar o ambiente.

Como resultado, a fitorremediação deve ser considerada um componente de uma abordagem integrada de gestão ambiental, e, caso necessário, deve ser complementada por outras técnicas de remediação. O estudo de novas espécies de plantas hiperacumuladoras e o desenvolvimento de técnicas para superar as limitações atuais são dois dos principais objetivos da pesquisa futura, que devem se concentrar na melhoria dos processos de fitorremediação. Será necessário que pesquisadores, gestores ambientais e formuladores de políticas trabalhem juntos para promover a adoção e o aprimoramento desta técnica, o que resultará em um ambiente mais saudável e sustentável.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As pesquisas conduzidas neste estudo mostraram que a fitorremediação é um método promissor para a eliminação de poluentes, bem como os danos que tais poluentes causam tanto ao ser humano quanto à natureza. Também mencionou espécies vegetais benéficas para a remediação de diversos poluentes. A fitorremediação é uma opção ecológica que auxilia na recuperação de ecossistemas deteriorados e incentiva a biodiversidade. No entanto, a implementação dessas técnicas apresenta obstáculos como resistência a altas concentrações de poluentes, profundidade e biodisponibilidade do mesmo, a variações ambientais e tempo de remediação, sendo necessário avaliar qual espécie se ajusta melhor ao problema e se é eficiente em situações de alta contaminação. Outro aspecto é o clima e a extensão em que o poluente se infiltra no solo.

Com os pontos apresentados é possível responder à questão que levou ao desenvolvimento do presente trabalho, que é: quais as perspectivas da fitorremediação? É uma metodologia que tem potencial? Vale investir em estudos na área?

É crucial discutir essas restrições em estudos futuros, bem como realizar estudos que se concentrem em encontrar espécies que sanem as limitações encontradas na fitorremediação.

Outro tópico a se dar atenção é investigar a combinação da fitorremediação com outros métodos de remediação e com outras áreas do conhecimento. Focar também em espécies que sejam naturais dos biomas brasileiros visto que, algumas das pesquisas realizadas por pesquisadores nacionais tem como foco espécies exóticas que, a longo prazo podem ter efeitos negativos. Portanto, reitero a importância de investir em estudos e progresso neste campo, em busca de soluções inovadoras para os desafios da poluição ambiental.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

Ali H, Khan E, Sajad MA (2013). Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. *Chemosphere*, v. 91, n. 7, p. 869-881. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>. Acesso em 24 agosto 2024.

Amado S, Chaves JTF (2015). Fitorremediação: uma alternativa sustentável para remediação de solos contaminados por metais pesados. *Natureza Online*, v. 13, n. 4, p. 159-164. Acesso em 23 agosto 2024.

Andrade MF, Moraes LRS (2013). Contaminações por chumbo em Santo Amaro desafia décadas de pesquisa e a morosidade do poder público. *SciELO*. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1414-753X2013000200005>. Acesso em: 22 agosto 2024.

Biblioteca Virtual em Saúde, Ministério da Saúde (2022). Semana internacional de prevenção a intoxicação por chumbo. Disponível em: <https://bvsmis.saude.gov.br/23-a-29-10-semana-internacional-de-prevencao-da-intoxicacao-por-chumbo/#:~:text=O%20chumbo%20produz%20efeitos%20delet%C3%A9rios,da%20libido%2C%20d%C3%A9ficits%20de%20intelig%C3%A9ncia>. Acesso em: 11 agosto 2024.

Brasil. Ministério da Saúde (2023). Intoxicações exógenas por agrotóxicos no Brasil - 2013 a 2022. [Brasília]: Ministério da Saúde. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins/epidemiologicos/edicoes/2023/boletim-epidemiologico-volume-54-no-12#:~:text=Entre%20janeiro%20de%202013%20e,agrot%C3%B3xicos%20em%20todo%20o%20Brasil>. Acesso em: 22 agosto 2024.

Campos É, Pereira C, Freire C, Silva IFD (2021). Respiratory hospitalizations and their relationship with air pollution sources in the period of fifa world cup and olympic games in rio

de janeiro, brazil. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(9), 4716. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph18094716>. Acesso em: 09 outubro 2024.

Carvalho LFC (2023). Espécies vegetais para fitorremediação de contaminantes orgânicos: uma revisão de literatura. Universidade Federal de Uberlândia. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/39121>. Acesso em: 13 dezembro 2024.

Centro Estadual de Vigilância em Saúde RS. Chumbo. Disponível em: <https://cevs.rs.gov.br/chumbo>. Acesso em: 13 dezembro 2024.

Cipro, C.V.Z., Cherel, Y., Bocher, P. *et al.* Trace elements in invertebrates and fish from Kerguelen waters, southern Indian Ocean. *Polar Biol* 41, 175–191 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00300-017-2180-6>. Acesso em 10 agosto 2024.

Costa VS (2019). Rizobactérias na fitorremediação de solos. UFMG. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/simple-search?query=rizobacterias+na+fitorremedia%C3%A7%C3%A3o+de+solos>. Acesso em: 21 agosto 2024.

Dagessedaryl F (2013). Efeitos do ciclo de congelamento na estabilidade hídrica de agregados do solo. *Canadian Journal of Soil Science*, 93(4), 473-483. Disponível em: <https://doi.org/10.4141/cjss2012-046>. Acesso em: 09 outubro 2024.

Da Silva FBT, Faria TL, Cabanas A, Simões GS (2016). Árvores freatófitas: processo de fitorremediação aos resíduos industriais. *Revista Univap*, v. 22, n. 40, p. 235-235. Acesso em: 16 agosto 2024.

DalCorso G, Fasani E, Manara A, Visioli G, Furini A (2019). Heavy Metal Pollutions: State of the Art and Innovation in Phytoremediation. *International Journal of Molecular Sciences*. 20(14):3412. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijms20143412>. Acesso em: 27 agosto 2024.

De Oliveira AR, Lima KCSL, Guimarães MM, Gomes RM, Silva DO (2019). Avaliação do girassol (*Helianthus annuus* L) como fitorremediador quanto à remoção chumbo (Pb) e zinco (Zn) em solos contaminados. *Revista do CENAR*, v. 1, n. 1, p. 241-250. Acesso em: 27 agosto 2024.

Fernandes LC (2022). Fitorremediação de solo ou substrato contaminado pela ação do homem no ambiente. Trabalho de Conclusão de Curso, Grupo Educacional Faveni. Disponível em: https://files.comunidades.net/saudeintegral/TCC_de_FERTILIZACAO_de_SOLOS_2022_Luiz_Carlos_Fernandes.pdf. Acesso em: 27 agosto 2024.

Fernandes AS, Caneiras C, Oliveira NG, Costa J, Cabral MF, Castro M. Cádmiu: fontes de exposição e efeitos tóxicos para o ser humano. ASAE. Disponível em: <https://www.asae.gov.pt/seguranca-alimentar/riscos-quimicos/cadmio.aspx>. Acesso em: 27 agosto 2024.

Francischetti CE, Santos NCD, Silva RGD. (2014). Analysis of electric vehicles: a brazilian reality and its consequences for the environment. *Renewable Energy and Power Quality Journal*. Disponível em: <https://doi.org/10.24084/repqj12.283>. Acesso em: 09 outubro 2024.

França RSSSR, Miranda EÉV, Paim GW (2023). Potencial de espécies arbóreas nativas para fitorremediação de solos de cerrado: revisão bibliográfica. *Universidade Estadual de Montes Claros*, v. 21, n. 01, p. 377-398. Disponível em: <https://doi.org/10.46551/rc24482692202315>. Acesso em: 13 dezembro 2024.

Garzón JM, Rodríguez-Miranda JP, Hernández-Gómez C (2017). Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible. *Universidad y salud*, v. 19, n. 2, p. 309-318. Disponível em: <https://doi.org/10.22267/rus.171902.93>. Acesso em: 09 outubro 2024.

Hauptvogel M, Kotrla M, Prčík M, Pauková Ž, Kováčik M, Lošák T (2020). Phytoremediation Potential of Fast-Growing Energy Plants: Challenges and Perspectives – a Review. *Polish*

Journal of Environmental Studies, 29(1):505-516. Disponível em: doi:10.15244/pjoes/101621.. Acesso em: 20 agosto 2024.

Holzbach JC, Krauser MO, Siebeneichler SC (2020). A evolução e interdisciplinaridade nas pesquisas sobre fitorremediação de poluentes orgânicos: o caso do TNT. Revista Virtual de Química, v. 12, n. 3. Acesso em: 09 outubro 2024.

Johnson LE (2023). Excesso de cromo. Manual ESD. Disponível em: <https://www.msmanuals.com/pt/casa/dist%C3%BArbios-nutricionais/minerais/defici%C3%A2ncia-de-cobre>. Acesso em: 23 agosto 2024.

Kumar M, Xiong X, He M, Tsang DCW, Gupta J, Khan E, Harrad S, Hou D, Ok IS, Bolan NS, (2020). Microplastics as pollutants in agricultural soils. Environmental Pollution, 265, 114980. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114980>. Acesso em: 09 outubro 2024.

Larson RA, Sims GK (2003). Atrazine Removal Using Aquatic Plants: A Kinetic Approach. RR Series (Illinois Waste Management and Research Center); n. 100. Acesso em: 23 agosto 2024.

Lepsch IF (2016). Formação e conservação dos solos. 216 p. Acesso em: 20 agosto 2024.

Liu W, WU J, ZHAO X (2013). Características estruturais e estabilidade dos agregados em solos de pomares com diferentes anos de cultivo no norte da China. Advanced Materials Research, 864-867, 2569-2576. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.864-867.2569>. Acesso em: 09 outubro 2024.

Marinov I, Marinov AM (2014). A coupled mathematical model to predict the influence of nitrogen fertilization on crop, soil and groundwater quality. Water Resources Management, 28(15), 5231-5246. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0664-5>. Acesso em: 09 outubro 2024.

Martins CDC (2015). Fitorremediação de solo oriundo de área industrial multicontaminado com metais pesados e hidrocarbonetos do petróleo por girassol (*Helianthus annuus*). Tese de Doutorado, EPQB. Disponível em: <http://epqb.eq.ufrj.br/teses-de-doutorado/>. Acesso em: 21 agosto 2024.

Masindi V, Muedi KL (2019). Environmental contaminants by heavy metals. Intech Open. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.76082>. Acesso em: 11 julho 2024.

McConnell JR, Chellman NJ, Andrew IW, Stohl A, Arienzo MM, Eckhardt S, Fritzsche D, Kipfstuhl S, Opel T, Place PF, Steffensen JP (2019). Pervasive Arctic lead pollution suggests substantial growth in medieval silver production modulated by plague, climate, and conflict. National Library of Medicine. Disponível em: 10.1073/pnas.1904515116. Acesso em: 11 julho 2024.

Mejía PVL, Andreoli FN, Andreoli C, Serrat BM (2014). Metodologia para seleção de técnica de fitorremediação em áreas contaminadas. Revista Brasileira de Ciências Ambientais (RBCIAMB), n. 31, p. 97-104. Acesso em: 11 julho 2024.

Morita AKM, Moreno FN (2022). Fitorremediação aplicada a áreas de disposição final de resíduos sólidos urbanos. Engenharia Sanitária e Ambiental, 27(2), 377-384. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220210105>. Acesso em: 10 agosto 2024.

Oliveira TCR. Fitorremediação de solos contaminados com metais pesados utilizando culturas energéticas. Dissertação de Mestrado, UMINHO. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/simple-search?query=fitorremedia%C3%A7%C3%A3o+de+solos+contaminados+com+metais+pesados+utilizando+culturas+energetica>. Acesso em: 21 agosto 2024.

Padula NAMR, Abreu MH, Miyazaki LCY, Tomita NE (2005). Intoxicação por chumbo e saúde infantil: ações intersetoriais para o enfrentamento da questão. Cadernos de Saúde Política, 22(1), 163-171. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-311X2006000100017>. Acesso em: 21 agosto 2024.

Petersen BC, Souza DM, Schneider JB, Silva JL, Ludwig LC, Modolo RCE, Evaldt DC, Moraes CAM (2023). Uso da fitorremediação como tratamento para recuperação de áreas degradadas. Revista Foco, v. 16, n. 02. Disponível em: <https://doi.org/10.54751/revistafoco.v16n2-112>. Acesso em: 21 agosto 2024.

Schottz BS, Marques MÊS, Gonzalez WA, Tavares SRL (2023). Fitorremediação em solo contaminado pelo metal chumbo. Embrapa. Disponível em:

<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/263415/1/Fitorremediacao-em-solo-contaminado-pelo-metal-chumbo-2023.pdf>. Acesso em: 21 agosto, 2024.

Silva AMCD, Moi GP, Mattos IE, Hacon SDS (2014). Low birth weight at term and the presence of fine particulate matter and carbon monoxide in the brazilian amazon: a population-based retrospective cohort study. *BMC Pregnancy and Childbirth*. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/1471-2393-14-309>. Acesso em: 09 outubro 2024.

Silva TJ, Hansted FAZ, Tonello PS, Goveia D (2019). Fitorremediação de solos contaminados com metais: Panorama atual e perspectivas de uso de espécies florestais. *Revista Virtual de Química*, v. 11, n. 1, p. 18-34. Acesso em: 14 julho 2024.

Silva J, Rosa GB, Sganzerla WG, Ferrareze JP, Simioni FJ, Campos ML(2023). Strategies and prospects in the recovery of contaminated soils by phytoremediation: an updated overview. *Communication in Plant Science*, v. 13, p. 001-012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.26814/cps2023001>. Acesso em: 14 julho 2024.

Tamayo-Ortiz M, Navia-Antezana J (2018). Reduced Lead Exposure Following a Sensitization Program in Rural Family Homes Producing Traditional Mexican Ceramics. *Annals Global Health*, 84(2), p. 285-291. Disponível em: <https://doi.org/10.29024%2Faogh.916>. Acesso em: 12 agosto 2024.

Wang H, Zhao L, Liang W (2011). Efeito dos sistemas de preparo do solo na construção do perfil do solo e na estabilidade dos agregados no cinturão de milho da planície de Songliao. *Mecânica Aplicada e Materiais*, 130-134, 3693-3696. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.130-134.3693>. Acesso em: 09 outubro 2024.

Willians JO, Inweregbu OA (2019). Comparative bioremediation potentials of pseudomonas aeruginosa kx828570 and bacillus megaterium ky085976 on polluted terrestrial soil treated with oil spill dispersant. *South Asian Journal of Research in Microbiology*, 1-17. Disponível em: <https://doi.org/10.9734/sajrm/2019/v4i230101>. Acesso em: 09 outubro 2024.

Wuana RA, Okieimen FE (2011). Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation. Wiley, v. 2011, p.1. Disponível em: <https://doi.org/10.5402/2011/402647>. Acesso em: 21 agosto.

Xukai H, Chen J, Zhu L (2020). Distribuição do tamanho dos agregados do solo e estabilidade de terras agrícolas afetadas por métodos de peneiramento seco e úmido. *Zemdirbyste-Agriculture*, 107(2), 179-184. Disponível em: <https://doi.org/10.13080/z-a.2020.107.023>. Acesso em: 09 outubro 2024.

Yan A, Wang Y, Tan SN, Yusuf MLM, Ghosh S, Chen Z (2020). Phytoremediation: A Promising Approach for Revegetation of Heavy Metal-Polluted Land. *Frontiers in plant Science*, v. 11. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00359>. Acesso em: 9 julho 2024.