



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE BIOCÊNCIAS

ANÁLISE DO POTENCIAL DA FITORREMEDIAÇÃO E ASPECTOS DA  
ATUALIDADE SOBRE O ESTADO DA ARTE NO BRASIL

LUIZ CARLOS CASTRO DE ARAUJO LIMA

Rio de Janeiro

2023

Luiz Carlos Castro de A. Lima

ANÁLISE DO POTENCIAL DA FITORREMEDIAÇÃO E ASPECTOS DA  
ATUALIDADE SOBRE O ESTADO DA ARTE NO BRASIL

Monografia do Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Instituto de Biociências da Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos à obtenção do título de Bacharel em Ciências Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. César Luis Siqueira Junior

Rio de Janeiro

2023

[Sistema de Geração de Ficha Catalográfica \(unirio.br\)](http://unirio.br)

**LIMA**, Luiz Carlos Castro de A.

Análise do potencial da fitorremediação e aspectos da atualidade sobre o estado da arte no Brasil; 2023 64 f.

Monografia do Trabalho de Conclusão de Curso

Orientador: Prof. Dr. César Luis Siqueira Junior

1 – Biotecnologia    2 – Fitorremediação    3 – Poluição Ambiental

I. Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro

II. Análise do potencial da fitorremediação e aspectos da atualidade sobre o estado da arte no Brasil

Luiz Carlos Castro de A. Lima

ANÁLISE DO POTENCIAL DA FITORREMEDIAÇÃO E ASPECTOS DA  
ATUALIDADE SOBRE O ESTADO DA ARTE NO BRASIL

Monografia do Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Instituto de Biociências da Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos à obtenção do título de Bacharel em Ciências Ambientais.

Aprovado em \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

---

(Dr. César Luis Siqueira Junior – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro)

---

(Dra. BANCA I – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro)

---

(Dra. BANCA II – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro)

*Com carinho e dedicação em especial para a minha avó Berenice Machado, sei que gostaria de partilhar este marco ao meu lado (in memoriam), a persistência e a esperança podem mover montanhas, efetivamente são características para a prosperidade.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à minha falecida avó Berenice Machado, diante de todo o conforto em seus braços que me foi dado na infância, todo o apoio espiritual que recebi por através do tecido vital que nos separa.

Aos meus pais, Giovanna e Carlos Alberto, e irmã, Ana Lucia, pelo carinho e amor de partilhar muitas vezes do mesmo solo, mesmo abrigo. Meros agradecimentos não são capazes de expressar a tamanha grandeza da gratidão por fazerem parte da minha construção.

À minha melhor amiga e meu grande amor, Lívia Adriana, por me apoiar e incondicionalmente encher minha vida de alegria, por estar ao meu lado dividindo sorrisos e dificuldades aos quais, só nós poderemos realmente exprimir em palavras as dores e glórias da segunda metade dessa jornada acadêmica.

Aos meus tios, Nem (Russo) e Sandra, por estarem ao meu lado durante processos e fases que experimentei ao curso de toda jornada, que em conjunto com meu tio Paulinho, foram grandes personagens para estimular minha percepção ambiental.

Agradecimento em especial ao meu orientador Dr. César Luis Siqueira, que me recebeu de braços abertos em seu laboratório no Núcleo de Pesquisa em Sistemas Agrícolas (NuPSA), que nunca deixou o meu ânimo cair diante das atividades e experimentos diários em laboratório, tornando-me apto à realizar uma pesquisa de devido cunho ambiental.

Agradeço á banca examinadora, prof<sup>a</sup> Fernanda Penelas e prof<sup>a</sup> Laura Jane, por ter recebido a oportunidade de ter trabalhado com docentes tão incríveis e tê-las adjuntas na defesa do meu Trabalho de Conclusão de Curso.

Agradeço a Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro (UNIRIO) por me possibilitar experiências tão ricas quanto o espírito acadêmico, as quais fui envolvido em assuntos multidisciplinares que permitiram a formação de uma postura para realização deste estudo.

À Pro-Reitoria de Assuntos Estudantis (PRAE) por ter sido contemplado em 2018/19 à uma bolsa de incentivo acadêmico, recebendo orientação da Dra. Laura Jane e pelo Dr. Daniel Fonseca, com participação da Bibliotecária Sheila Sampaio.

A todos os amigos e amigas que fizeram parte dessa realização, trazendo alegria e paz diante dos momentos de tensão; em especial as Mestras e grandes amigas, Gabi Heliodoro e Cristiane Rangel, que me forneceram direção e instrução na passagem do Técnico em Meio Ambiente para a graduação em Ciências Ambientais na UNIRIO.

A todos o meu muito obrigado!

## RESUMO

A contaminação do solo e das águas constitui um alarmante problema ambiental em todo o mundo, levando à um desafio global para os saberes técnico-científicos, desenvolverem estratégias para minimizar o contaminante ambiental. A Fitorremediação é uma combinação do prefixo phyto = planta; e o sufixo remedium, que significa curar, restaurar ou limpar ambientes através dos processos ecológicos para descontaminação por meio de remoção, redução, degradação e contenção do contaminante. Embora a sua aplicação ainda seja limitada, o novo rótulo “fitorremediação” ganha notoriedade ao longo dos anos por investigadores e partes interessadas, pelas suas características atraentes, como sua compatibilidade ambiental e alternativa de baixo custo, em função da sua economicidade, que se fundamenta na utilização da energia solar e de constituintes naturais, a partir de espécies vegetais empregadas diretamente in situ para promover a remoção de diversas classes de contaminantes das matrizes ambientais. Deste modo, o potencial dessa ferramenta biotecnológica, tem despertado interesse mundial e particularmente para o Brasil, pois se torna interessante, dada a rica biodiversidade e clima favorável aos processos biológicos. Nesse sentido o trabalho teve por objetivo conhecer o cenário atual da pesquisa científica a partir de diversos aspectos e perspectivas desta recente tecnologia, levando em consideração as fragilidades e o potencial como alternativa aos métodos convencionais, abordando os principais desafios futuros da remediação sinérgica e o melhoramento genético das espécies, deliberando sobre os processos fisiológicos envolvidos nos mecanismos, as propriedades das plantas utilizadas e aspectos gerais dos contaminantes, como também as vantagens e desvantagens dessa tecnologia. A pesquisa apresenta a fitorremediação como promissora para a neutralização tecnogênica.

**Palavras-Chave:** Biotecnologia, Fitorremediação, Poluição Ambiental.

## **ABSTRACT**

Soil and water contamination constitutes an alarming environmental problem throughout the world, leading to a global challenge for technical-scientific knowledge to develop strategies to minimize environmental contaminant. Phytoremediation is a combination of the prefix phyto = plant; and the suffix remedium, which means to heal, restore or clean environments through ecological processes for decontamination through removal, reduction, degradation and containment of the contaminant. Although its application is still limited, the new label “phytoremediation” has received notoriety over the years among researchers and interested parties, due to its attractive characteristics, such as its environmental compatibility and low-cost alternative, due to its economy, which is based on the use of solar energy and natural constituents, from plant species used directly in situ to promote the removal of various classes of contaminants from environmental matrices. Thus, the potential of this biotechnology tool has aroused worldwide interest and particularly for Brazil, as it is interesting, given the rich biodiversity and climate favorable to biological processes. In this sense, the work aimed to understand the current scene of scientific research from different aspects and perspectives of this recent technology, taking into account the weaknesses, strengths and potential as an alternative to conventional methods, addressing the main future challenges of synergistic remediation and improvement genetics of the species, deliberating on the physiological processes involved in the mechanisms, the properties of the plants used and general aspects of the contaminants, as well as the advantages and disadvantages of this technology. The research presents phytoremediation as promising for technogenic neutralization and contaminated environments, preventing new migrations of ecotoxicants into ecosystems.

**Keywords:** Biotechnology, Phytoremediation, Environmental Pollution.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Mecanismos potenciais para remoção de contaminantes.....	15
Figura 2: Número de estudos científicos apresentados para cada termo pesquisado na plataforma Scholar Google.....	20
Figura 3: Etapas para a seleção de materiais seguindo os critérios pré-estabelecidos para a revisão bibliográfica .....	21
Figura 4: Número de sítios remediados distribuídos de acordo com os tipos de contaminantes .....	26
Figura 5: Mecanismos fitotecnológicos de plantas fitorremediadoras .....	28
Figura 6: Outros mecanismos fitotecnológicos .....	31
Figura 7: Esquema mostrando a natureza interdisciplinar da pesquisa em fitorremediação .....	40

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Número de estudos científicos encontrados para cada termo pesquisado nas plataformas de base de dados .....	19
Quadro 2: Substâncias orgânicas e inorgânicas passíveis de processo de fitorremediação.....	26
Quadro 3: Alguns méritos das plantas nativas sobre as plantas não nativas na fitorremediação .....	42

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

Ag .....	Prata
ANA .....	Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico
As.....	Arsênio
B .....	Boro
BTEX.....	Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos
Cd .....	Cadmio
CETESB .....	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
Co .....	Cobalto
CONAMA .....	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPAM.....	Conselho Estadual de Política Ambiental
Cr .....	Cromo
Cu .....	Cobre
DNA .....	Ácido desoxirribonucleico
EMBRAPA.....	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO .....	Food and Agriculture Organization
Fe .....	Ferro
GAC.....	Gerenciamento de Áreas Contaminadas
Hg .....	Merúrio
HMs.....	Heavy Metals
ICMBIO.....	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
ISO.....	International Organization for Standardization
ITPS.....	Painel Técnico Internacional sobre Solos

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

Mn.....	Manganês
Mo.....	Molibdênio
MP .....	Metais Pesados
NaCl.....	Cloreto de Sódio
Ni.....	Níquel
PAH'S.....	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
Pb.....	Chumbo
PCBs .....	Bifenilas Policloradas
pH .....	Potencial Hidrogeniônico
PHC .....	passive heave compensators
PNRH .....	Política Nacional dos Recursos Hídricos
POPs .....	Poluentes Orgânicos Persistentes
PPCPs .....	Produtos Farmacêuticos e de Cuidados Pessoais
Se.....	Selênio
SISNAMA .....	Sistema Nacional do Meio Ambiente
Sr.....	Estrôncio
Ti.....	Titânio
TNT .....	Trinitrotolueno
U .....	Urânio
VOCs .....	Compostos Orgânicos Voláteis
Zn.....	Zinco

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	
1.1.	POLUIÇÃO AMBIENTAL	11
1.2.	FITORREMEDIAÇÃO DE CONTAMINANTES	13
1.3.	PROCESSOS FITOFISIOLÓGICOS PARA REMEDIAÇÃO	14
1.4.	MECANISMOS DA FITORREMEDIAÇÃO	14
1.5.	PROPRIEDADES DAS ESPÉCIES FITORREMEIADORAS	15
2.	OBJETIVO	17
2.1.	OBJETIVO GERAL	17
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	18
4.	ESTADO DA ARTE	22
4.1.	BIORREMEDIAÇÃO (ASPECTOS GERAIS)	22
4.1.1	FORMAS DE REMEDIAÇÃO QUANTO A ORIGEM	22
4.1.1.1	IN SITU	22
4.1.1.2	EX SITU	22
4.2.	FITORREMEDIAÇÃO	22
4.2.1.	FATORES QUE INFLUENCIAM A EFICIÊNCIA DA ABSORÇÃO DE POLUENTES E O DESENVOLVIMENTO VEGETATIVO	23
4.2.1.1.	CARACTERÍSTICAS DO MEIO	24
4.2.1.2.	ECOTOXICIDADE	25
4.2.1.3.	FITOTOXICIDADE (TOXICIDADE E ESTUDOS DE TOLERÂNCIA)	25
4.2.1.4.	CONTAMINANTES	25
4.2.1.4.1.	POLUENTES ORGÂNICOS	27
4.2.1.4.2.	POLUENTES INORGÂNICOS	27
4.2.2.	MECANISMOS FITOTECNOLÓGICOS	28
4.2.2.1.	FITOEXTRAÇÃO/FITOACUMULAÇÃO/FITOABSORÇÃO	29
4.2.2.2.	FITOTRANSFORMAÇÃO/FITODEGRADAÇÃO	29
4.2.2.3.	FITOVOLATILIZAÇÃO	29
4.2.2.4.	FITOSTABILIZAÇÃO	29
4.2.2.5.	RIZODEGRADAÇÃO	30
4.2.2.6.	FITOSTIMULAÇÃO	30
4.2.2.7.	RIZOFILTRAÇÃO/FILTRAÇÃO ATMOSFÉRICA	31
4.2.2.8.	CONTROLE HIDRÁULICO	31
4.2.2.9.	DENDROREMEDIAÇÃO	32
4.3.	APLICABILIDADE DAS FITOTECNOLOGIAS	32
4.3.1.	FITORREMEDIAÇÃO UTILIZANDO PLANTAS AQUÁTICAS	32
4.3.2.	FITORREMEDIAÇÃO DE POLUENTES AGRÍCOLAS	33
4.3.3.	FITORREMEDIAÇÃO DE METAIS IN SITU	34
4.3.4.	FITORREMEDIAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS POR HIDROCARBONETOS	35
4.4.	BENEFÍCIOS E LIMITAÇÕES	36
4.5.	SELEÇÃO DE PLANTAS	39
4.6.	POTENCIAL DE ESPÉCIES NATIVAS FITORREMEIADORAS	41
4.7.	LEGISLAÇÃO	43
5	DISCUSSÕES	46
6	POTENCIALIDADES E DESAFIOS FUTUROS	49
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. POLUIÇÃO AMBIENTAL

O solo e a água são claramente dois dos recursos naturais muito importantes para a sustentação vida terrestre, portanto o problema da poluição ambiental deve ser enquadrado de forma primordial, pois a maioria dos seres humanos depende de recursos naturais, presentes e interligados ao meio ambiente, como meio de subsistência (PELICA, 2017).

A influência do homem na ecosfera tem sido extremamente ampla e complexa e, a expansão populacional e diversificação da atividade antrópica tem causado diversos impactos ambientais (NISHIMURA, 2020) que na maioria das vezes, leva a uma alteração irreversível, podendo ter efeitos adversos para os ecossistemas. A degradação dos ecossistemas devido aos poluentes tornou-se cada vez mais grave durante as últimas décadas do século XX, como resultado das atividades humanas, resultando no acúmulo de poluentes. Esta acumulação é um indicativo de que a capacidade de suporte dos ecossistemas receptores foi claramente sobrecarregada (GARBUSU, 2002) e, portanto, de um ponto de vista antropocêntrico, tais efeitos podem comprometer a segurança alimentar e saúde humana (WANG, 2007).

Diversos contaminantes causam impactos negativos no meio ambiente, que diante do acúmulo de químicos tóxicos, podem ocasionar a poluição do ambiente, colocando em risco a saúde humana e dos ecossistemas (ARÉVALO, 2020). Dentre os compostos químicos poluentes capazes de causar a contaminação, estão os compostos:

- agroquímicos (MOREIRA e SIQUEIRA, 2006), compostos organofosforados; solventes e compostos nitro aromáticos (MEGHARAJ, 2011);
- metais tóxicos (FRANCO *et al.*, 2004) como, por exemplo, B (Boro), Cd (Cádmio), Co (Cobalto), Cr (Cromo), Cu (Cobre), Hg (Mercúrio), Ni (Níquel), Pb (Chumbo), Zn (Zinco); entre outros que excedam o limite natural da capacidade de um ecossistema.
- hidrocarbonetos [por exemplo, hidrocarbonetos alifáticos, aromáticos, aromáticos policíclicos (PAHs), BTEX (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos), hidrocarbonetos clorados e policlorados (PCBs), entre outros].
- dejetos, resíduos e/ou lodo de esgoto urbano (ARÉVALO, 2020); e resíduos gerados por atividades relacionadas à extração de petróleo e seus derivados (MEDAURA e ÉRCOLI, 2008; PASSOS *et al.*, 2009);
- Substâncias com potencial xenobiótico como, por exemplo produtos farmacêuticos e de cuidados pessoais (PPCPs) (CHEN-JING LIU *et al.*, 2023).

O Painel Técnico Intergovernamental sobre Solos (ITPS) (FAO, 2015) apresenta a diferença entre contaminação e poluição:

A contaminação do solo ocorre quando a concentração de um produto químico ou substância é maior do que ocorreria naturalmente, mas não está necessariamente causando danos, enquanto a poluição do solo se refere à presença de um produto químico ou substância fora do lugar e/ou presente em uma concentração superior ao normal que tem efeitos adversos em qualquer organismo não-alvo (FAO, 2015; RODRÍGUEZ-EUGENIO *et al.*, 2018).

Portanto, um solo poluído pode ser definido como um solo com uma concentração de contaminante que excede o nível definido pela regulamentação aplicável (CASTELO-GRANDE, 2010).

A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB (2001), apresenta o conceito de "Áreas Contaminadas", relativamente recente na política ambiental dos países desenvolvidos, o mesmo ocorrendo no Brasil, como sendo uma área, local ou terreno, cujo solo sofreu dano ambiental significativo, causado pela introdução de forma planejada, acidental ou até mesmo natural, de quaisquer substâncias ou resíduos que nela tenham sido depositados, acumulados, armazenados, enterrados ou infiltrados no substrato, que o impede de assumir suas funções naturais ou legalmente garantidas.

Dessa forma, tem sido despertado em todo o mundo a preocupação com a degradação do ambiente, na busca por alternativas de descontaminação e recuperação visando recompor as funções ecossistêmicas (BRAUN *et al.*, 2019). O emprego dos termos “recuperação” e restauração”, significam readquirir uma condição, enquanto o termo “remediação”, frequentemente utilizado internacionalmente (“remediation”), significa dar remédio, sanear, tornar um área saudável, curar (HANSEN, 2012).

As técnicas convencionais de processos químicos e físicos, comumente utilizadas no passado, são extremamente caras para os municípios e governos, caracterizadas como degradantes para o ambiente e impraticáveis em grande escala (BERNARDINO, 2016), assim há uma necessidade urgente de procurar soluções sustentáveis ou ecologicamente corretas que englobem: eficiência na descontaminação, simplicidade na execução, tempo demandado pelo processo e menor custo (PIRES, 2003), conferindo ampla aplicação na restauração de locais contaminados (ARÉVALO, 2020; CUI *et al.*, 2022) ou como uma tecnologia complementar ao método de remediação convencional (PILON-SMITS, 2005). As técnicas de remediação

biológica são uma alternativa quando comparada com as químicas e físicas (CANTONI, 2019).

A fitorremediação é uma tecnologia promissora, a partir de uma abordagem simples, mas muito eficaz e ecológica (KURADE, 2021), baseada na utilização de algumas espécies vegetais com capacidade de degradar poluentes (CASTELO-GRANDE, 2010), integrando-se com a biologia da conservação, ao acelerar a recuperação dos ecossistemas naturais de mudanças antropogênicas locais ou mais generalizadas (DOBSON *et al.*, 1997).

Representando uma técnica rentável e utilizada como estratégia comercial, é uma alternativa de menor custo (BENEMANN *et al.*, 1994; SALT *et al.*, 1995) comparadamente aos métodos mais convencionais de eliminação e tratamento de resíduos, como escavação e aterro, tratamento térmico (incineração, dessorção), lavagem do solo e lixiviação, estabilização, vitrificação, recuperação elétrica e química. (MCGUINNESS & DOWLING, 2009; VANGRONSVELD, 2009; KANG, 2014; GERHARDT, 2015; ULLAH, 2015; YAVARI, 2015; MISRA, 2019).

## 1.2. FITORREMEDIAÇÃO DE CONTAMINANTES

A remediação da poluição requer grandes quantidades de energia (HORNE, 1999) e a fitorremediação é uma tecnologia natural movida a energia solar para a limpeza de matrizes contaminadas tem muitas vantagens potenciais, ganhando aceitação pública devido ao seu atributo estético, ecológico e de baixo custo (LEDUC AND TERRY 2005; MOSHINA, 2005; PILON-SMITS 2005; WEI *et al.* 2008; ODOH *et al.*, 2019) constituindo uma inovadora tecnologia com potencialmente aplicável em níveis baixos, médios ou altos de contaminantes ambientais em uma variedade de áreas contaminadas (ARTHUR, RICE & BALADI *et al.*, 2005; ODOH *et al.*, 2019), servindo como verdadeiros filtros “verdes” (PILON-SMITS, 2005).

Fitorremediação é uma combinação do prefixo phyto=planta; e o sufixo remedium, que significa curar ou limpar, termo relacionado à tecnologia de restauração ecológica, baseada no conceito de utilização de constituintes naturais do meio (MOSHINA, 2005) para descontaminação por meio de remoção, redução, degradação e contenção do contaminante, utilizando as plantas como principal ferramenta (ASANTE-BADU, 2020). Representa uma prática e técnica ambientalmente amigável para extrair ou degradar vários poluentes (BARTUCCA, 2023) em associação conjunta ou não aos microrganismos da rizosfera, área de influência e/ou localização física em volta da raiz (MOREIRA e SIQUEIRA, 2006), removendo, reduzindo, sequestrando, degradando ou imobilizando contaminantes do solo, promovendo assim a sua descontaminação (PILON-SMITS, 2005),



O método surge a partir de pesquisas básicas sobre a fisiologia de plantas halófitas e hiperacumuláveis (SHMAEFKY, 2020), sendo estabelecida como disciplina nas ciências ambientais no final da década de 1970 (BROOKS, 1977), ao verificar a capacidade e resistência que certas plantas possuem de capturar ou simplesmente neutralizar a ação de determinados compostos tóxicos nos solos e/ou nas águas (PILON-SMITS, 2005).

### 1.3. PROCESSOS FITOFISIOLÓGICOS PARA REMEDIAÇÃO

A fitorremediação é definida como o processo que utiliza plantas verdes para a translocação, transferência, estabilização ou degradação, que consista na limpeza do poluentes do solo, sedimentos, águas superficiais e subterrâneas, ou para torná-los inofensivos" (CUNNINGHAM, 1995; RASKIN, 1994; ELEKES, 2014).

A limpeza é definida como a destruição, inativação ou imobilização do poluente de forma inofensiva (HORNE, 1999). As plantas e microalgas (GARBUSU, 2001) possuem propriedades genéticas, bioquímicas e fisiológicas que as tornam agentes ideais para remediação (MEAGHER, 2000) de áreas contaminadas com substâncias inorgânicas (por exemplo, metais pesados, incluindo Cd, Pb, U e Cr) e/ou compostos orgânicos (por exemplo, substâncias perfluoroalquílicas e polifluoroalquílicas, pesticidas e PAHs) (CHEN-JING LIU et al., 2023) presentes no solo, água ou ar (GARBUSU, 2001), reabilitando substratos sólidos, líquidos e gasosos (PILON-SMITS, 2005; COUTINHO e BARBOSA, 2007; BARTUCCA, 2023).

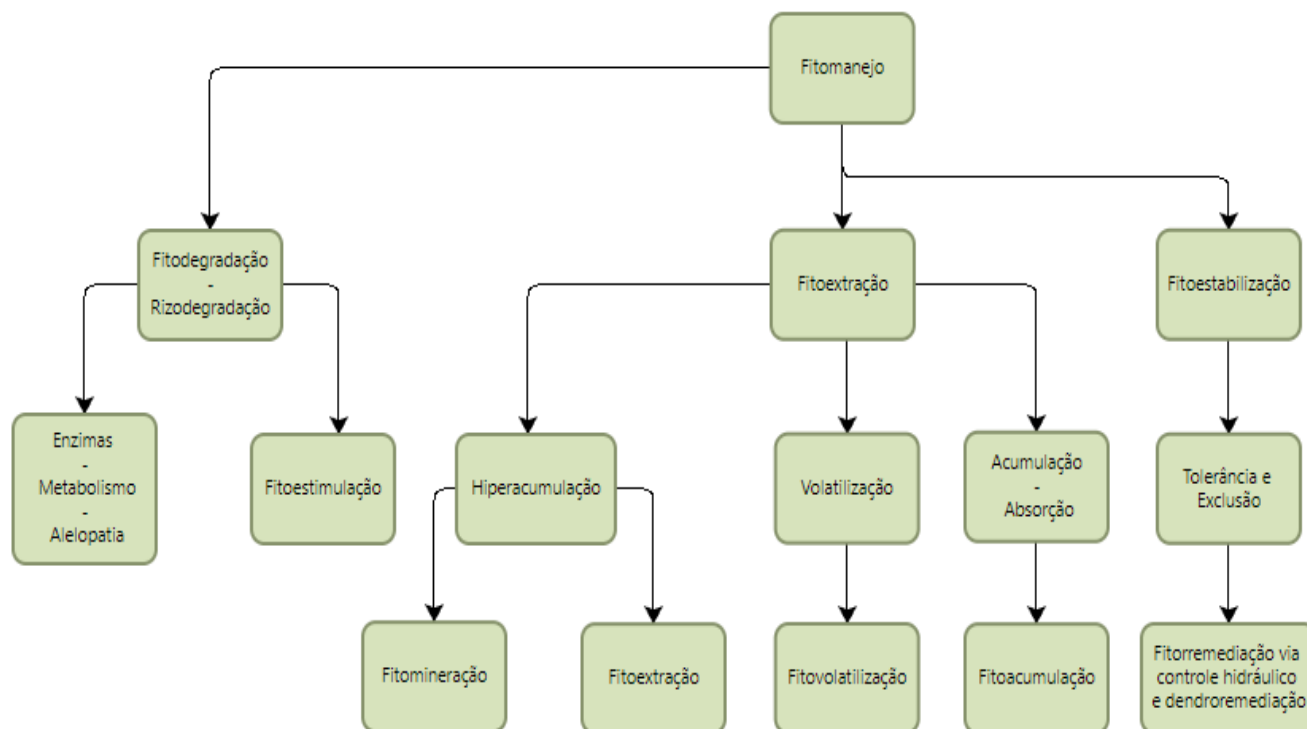
### 1.4. MECANISMOS DA FITORREMEDIAÇÃO

Os sistemas vegetais são capazes de remediar os contaminantes por três rotas diferentes: através das partes aéreas da planta (WEI *et al.* 2017), através do auxílio de microrganismos do solo (rizosfera) e pelos meios de cultivo sem solo (AYDOGAN E MONTOYA, 2011), atuando de forma direta e/ou indireta na redução e/ou remoção dos contaminantes.

Na remediação direta, os compostos são absorvidos, acumulados, imobilizados ou metabolizados nos tecidos vegetais. Na forma indireta, os vegetais extraem contaminantes das águas subterrâneas, reduzindo assim a fonte de contaminação ou quando a presença de plantas propicia um meio favorável ao aumento da atividade microbiana, que degrada o contaminante (TAVARES, 2009).

Existem vários mecanismos potenciais para remoção de contaminantes, estão subdivididos em: fitoacumulação/fitoextração, também chamadas de fitomineração e

biomineração, fitoestabilização/fitoimobilização, fitodegradação, fitovolatilização, (PILON-SMITS, 2005; ARTHUR, RICE & BALADI *et al.*, 2005; CARVALHO, 2023), fitofiltração (ARTHUR, RICE & BALADI *et al.*, 2005), rizofiltração, rizodegradação, controle hidráulico e cobertura vegetativa (CARVALHO, 2023).



**Figura 1:** Mecanismos potenciais para remoção de contaminantes.

Fonte: Traduzido pelo próprio autor (2023) de Robinson (2009).

Para a escolha dos métodos e apreciação destes mecanismos potenciais em cada tecnologia, é necessário considerações cuidadosas, exigindo uma melhor compreensão sobre alguns fatores que determinam a eficácia da fitorremediação (CHUNG-SHIT, 2007; MEGHARAJ, 2011), como a localização da área contaminada, características do solo, espécies vegetais fitorremediadoras e comunidade microbiana, e método de manejo para cada tipo de contaminantes (CHUNG-SHIT, 2007) com o objetivo de remove-los (ARTHUR, RICE & BALADI *et al.*, 2005).

### 1.5. PROPRIEDADES DAS ESPÉCIES FITORREMEIADORAS

Diferentes fitotecnologias utilizam diferentes propriedades das plantas e, normalmente, diferentes espécies de plantas são utilizadas para cada uma. As propriedades favoráveis das plantas para a fitorremediação em geral são: crescimento rápido, alta biomassa, competitivas,

resistentes e tolerantes ao poluente (PILON-SMITS, 2005), com também uma boa capacidade de absorção, sistema radicular profundo e fácil colheita (COUTINHO et al, 2007).

A característica fitorremediadora de um vegetal é derivada de sua bioatividade que lhe garantirá determinado caráter funcional (MENEGAES, 2021). Para serem utilizadas na fitorremediação, as espécies vegetais selecionadas devem ser tolerantes ao poluente a ser extraído, desenvolver rapidamente alta biomassa, acumular poluentes nas partes colhíveis, ter um sistema radicular bem desenvolvido e ter um alto fator de bioacumulação (ELEKES, 2014).

Esta seleção reflete uma grande variedade de razões, características de crescimento vegetativo rápido e bom, altas taxas de transpiração, um genoma definido, ampla distribuição de choupos-mãe e um sistema de enraizamento profundo (LANDMEYER, 2011).

## 2. OBJETIVO

### 2.1. OBJETIVO GERAL

Esta revisão teve por objetivo reunir informações diante da base de dados referente ao estado da arte aplicado à fitorremediação e suas aplicações técnicas em áreas contaminadas por contaminantes orgânicos e inorgânicos enquanto seus potenciais como biotecnologia vegetal e perspectivas futuras.

### 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Demonstrar os aspectos de eficácia como fitotecnologia e limitações técnicas diante da biodisponibilidade de contaminantes e fitotoxicidade,
- Analisar diferentes políticas e instrumentos como, legislações, decretos e resoluções para disseminar a implantação técnica ou conjunto de técnicas para cada área
- Descrever os obstáculos socioeconômicos que dificultam a difusão da fitorremediação no Brasil.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A revisão sistemática foi realizada de acordo com a metodologia proposta por Costa e Zoltowski (2014), para um guia do processo de construção, que resumidamente, consiste na:

- (1) delimitação da questão a ser pesquisada;
- (2) escolha das fontes dos dados;
- (3) eleição dos descritores para as buscas;
- (4) busca dos artigos;
- (5) seleção dos artigos, através da leitura dos resumos e da aplicação dos critérios de inclusão e exclusão;
- (6) extração dos dados dos artigos selecionados;
- (7) avaliação dos artigos;
- (8) síntese e interpretação dos dados.

Buscou-se retratar qual é o estado da arte da pesquisa da situação da fitorremediação ambiental no território Brasileiro, portanto, elencou-se os seguintes descritores:

- (a) Biorremediação, (b) Fitorremediação e (c) Áreas Contaminadas.

A informações foram reunidas através de revistas científicas, teses, livros e dissertações, por meio das bases de dados eletrônicos como, Scholar Google, SciELO, Capes, Base de Dados da Pesquisa Agropecuária (Portal EMBRAPA).

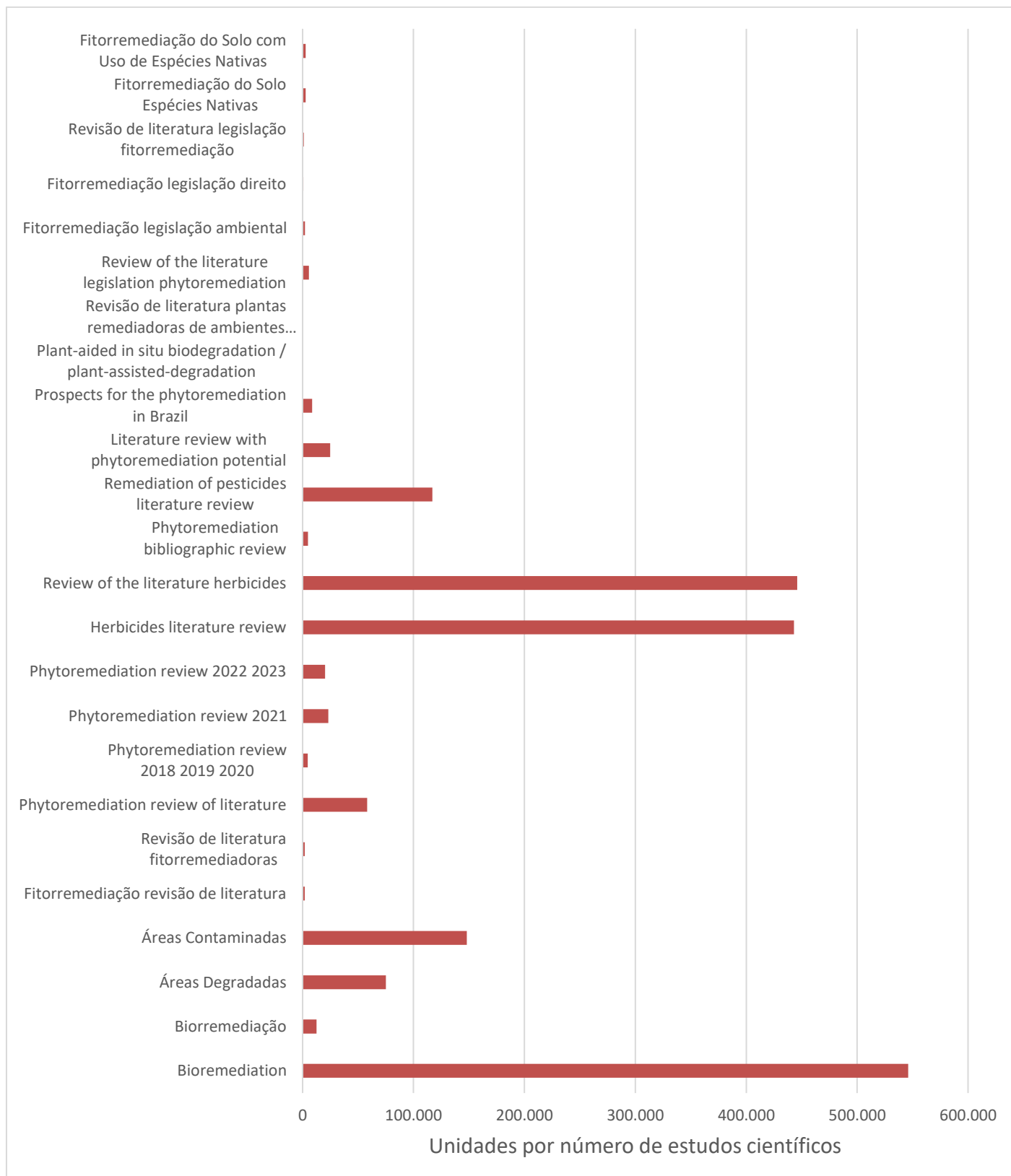
Palavras pesquisadas:

Bioremediation; Biorremediação; Áreas Degradadas; Áreas Contaminadas; Fitorremediação revisão de literatura; Revisão de literatura fitorremediadoras; Phytoremediation review of literature; Phytoremediation review 2018 2019 2020; Phytoremediation review 2021; Phytoremediation review 2022 2023; Herbicides literature review; Review of the literature herbicides; Phytoremediation bibliographic review; Remediation of pesticides literature review; Literature review with phytoremediation pontetial; Prospects for the phytoremediation in Brazil; Plant-aided in situ biodegradation / plant-assisted-degradation; Revisão de literatura plantas remediadoras de ambientes contaminados; Review of the literature legislation phytoremediation; Fitorremediação legislação ambiental; Fitorremediação legislação direito; Revisão de literatura legislação fitorremediação; Fitorremediação do Solo Espécies Nativas; Fitorremediação do Solo com Uso de Espécies Nativas.

**Quadro 1** - Número de estudos científicos encontrados para cada termo pesquisado nas plataformas de base de dados.

Bioremediation	546.000	Phytoremediation bibliographic review	4.760
Biorremediação	12.600	Remediation of pesticides literature review	117.000
Áreas Degradadas	75.100	Literature review with phytoremediation potential	24.800
Áreas Contaminadas	148.000	Prospects for the phytoremediation in Brazil	8.640
Fitorremediação revisão de literatura	1.880	Plant-aided in situ biodegradation / plant-assisted-degradation	252
Revisão de literatura fitorremediadoras	1.850	Revisão de literatura plantas remediadoras de ambientes contaminados	525
Phytoremediation review of literature	58.300	Review of the literature legislation phytoremediation	5.730
Phytoremediation review 2018 2019 2020	4.600	Fitorremediação legislação ambiental	2.220
Phytoremediation review 2021	23.100	Fitorremediação legislação direito	573
Phytoremediation review 2022 2023	20.300	Revisão de literatura legislação fitorremediação	1.140
Herbicides literature review	443.000	Fitorremediação do Solo Espécies Nativas	2.720
Review of the literature herbicides	446.000	Fitorremediação do Solo com Uso de Espécies Nativas	2.700
		total	1.780.730

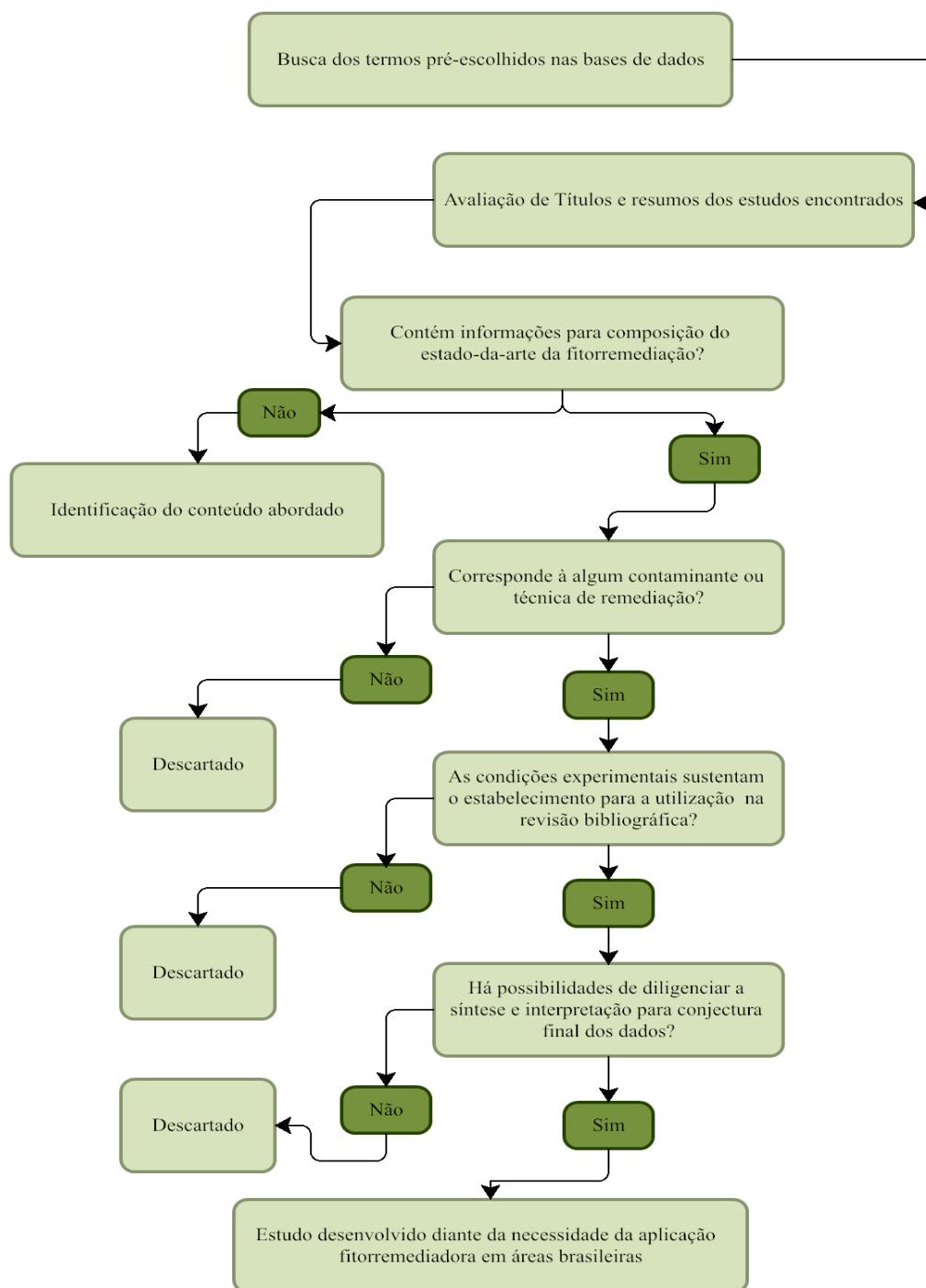
Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2023)



**Figura 2** – Número de estudos científicos apresentados para cada termo pesquisado na plataforma Scholar Google, visando a busca do estado da arte espécies fitorremediadoras e os mecanismos de remediação de áreas contaminadas e degradadas;

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2023).

Foram encontrados 1.780.730 artigos na fonte de dados, com 1920 reforçado na base de dados para seleção e descarte, sendo o referencial teórico, a base que sustenta o artigo, a partir do estudo de literatura desenvolvida por outros pesquisadores, contribuindo para a definição da temática.



**Figura 3** – Etapas para a seleção de materiais seguindo os critérios pré-estabelecidos para a revisão bibliográfica, buscando encontrar estudos que o estado da arte da fitorremediação de áreas contaminadas por compostos inorgânicos e/ou orgânicos.

Fonte: Adaptado pelo próprio autor (2023) de Carvalho (2003)



## 4. ESTADO DA ARTE

### 4.1. BIORREMEDIAÇÃO (ASPECTOS GERAIS)

Biorremediação é a conversão parcial ou completa do contaminante de interesse aos seus constituintes elementares envolvendo as capacidades de remoção pelos processos (MEGHARAJ *et al.*, 2011) em que os organismos vivos são empregados tecnologicamente, para remover, transformar ou reduzir a atividade de poluentes como os resíduos (NISHIMURA, 2020) e produtos químicos em lamas, solo contaminado ou material aquífero." (DASAPPA, LOECHR, 1991).

As tecnologias de biorremediação podem ser categorizadas em “in situ” e “ex situ” com base no local onde a tecnologia está sendo empregada.

#### 4.1.1. FORMAS DE REMEDIAÇÃO QUANTO A ORIGEM

##### 4.1.1.1. IN SITU

“In situ” é basicamente uma palavra latina que significa “no lugar original ou na posição apropriada, é a remediação no próprio local e se caracteriza por seus impactos positivos no meio ambiente através da absorção pelas plantas de uma forma econômica e ecológica. Os métodos biológicos oferecem a possibilidade de tratamentos in situ, através de atividades naturais dos organismos (GARBSU, 2002) para a limpeza de locais poluídos (MEGHARAJ, 2011).

##### 4.1.1.2. EX SITU

“Ex situ” é o deslocamento do substrato contaminado seguido de procedimento de remediação (KHAN, 2020). Também pode ser chamada de tecnologia de remediação externa, utilizando técnicas que removem o material contaminado de seu local de origem.

### 4.2. FITORREMEDIAÇÃO

A fitorremediação é um processo no qual as plantas verdes são usadas para remover, transferir, estabilizar e/ou destruir poluentes ou contaminantes como pesticidas, metais, etc., aproveitando suas habilidades naturais para absorver, acumular e/ou degradar constituintes de seus ambientes de solo e água, se apresenta como tecnologias promissoras de descontaminação, que utiliza recursos naturais através de organismos ou parte deles (KANG, 2014) para monitorar, prevenir e recuperar ambientes (BELTRANE, 2023).

#### 4.2.1. FATORES QUE INFLUENCIAM A EFICIÊNCIA DA ABSORÇÃO DE POLUENTES E O DESENVOLVIMENTO VEGETATIVO

Além da identificação do material vegetal e das características do organismo remediador, outros fatores irão afetar significativamente o crescimento e desenvolvimento das raízes e conseqüentemente a absorção vegetativa (GHOSH *et al.*, 2023) influenciando a eficiência do processo como método de fitorremediação. Para o tratamento de áreas contaminadas, a distribuição na área e as propriedades dos contaminantes (GHOSH *et al.*, 2023) como, as características físico-químicas do meio (por exemplo, a temperatura, pH e matéria orgânica) (GHOSH *et al.*, 2023), são fatores que podem influenciar a biodisponibilidade dos contaminantes (CHAPMAN, 2007; ODOH *et al.*, 2019), principalmente para os contaminantes orgânicos persistentes, onde a biodisponibilidade é frequentemente o principal fator que determina o sucesso da fitorremediação (ALKORTA E GARBISU, 2001).

Recentemente, a biodisponibilidade foi descrita na norma ISO 17402 de 2006 (ISO, 2006), como sendo “o grau em que químicos presentes no solo podem ser absorvidos ou metabolizados por seres humanos ou receptores ecológicos ou estão disponíveis para interação com sistemas biológicos”. Portanto entender a biodisponibilidade do ponto de vista de processos, como sendo as interações físicas, químicas e biológicas que determinam a exposição de seres vivos a essas substâncias, é essencial para determinar a eficácia de um tratamento (TELHADO *et al.*, 2010).

Os fatores ambientais como lixiviação para as águas subterrâneas, a biodegradação e as taxas de transferência para os organismos (SEMPLE *et al.*, 2003; REID, 2000 *apud.* JONES, 1996) também devem ser analisados. Contudo, é necessário levar em conta as especificações de poluentes e ambientes contaminados quando a fitorremediação é usada (MOREIRA e SIQUEIRA, 2006).

Tanto para degradação quanto para contaminação, faz-se necessária a avaliação da área, a investigação e identificação das causas e dos níveis de dano, definição das características regionais e as formas de recuperação ou remediação possíveis e viáveis. A resolução do CONAMA nº420, de 28 de dezembro de 2009 determina que primeiramente seja elaborada uma avaliação preliminar, que consiste na avaliação inicial; e a a etapa de diagnóstico servirá como base para a etapa seguinte, a de intervenção, pois a partir dos dados levantados com a investigação detalhada será determinado o método de remediação que será aplicado na área para sua recuperação.

#### 4.2.1.1. CARACTERÍSTICAS DO MEIO

Cada caso de poluição do solo, dos sedimentos, da água ou do ar é diferente e a forma de geri-lo exige uma ponderação cuidadosa de todos os fatores relevantes dentro dos limites estabelecidos pelas políticas sociais, aceitação e recursos disponíveis (MENCH, 2009).

##### a) Definição das características da água

A água é um bem natural essencial à vida e o Brasil é conhecido por apresentar corpos d'água em abundância. Mineral presente na natureza nos estados sólido, líquido e gasoso. É um recurso que se renova pelos processos físicos do ciclo hidrológico, decorrente da ação do calor do sol e das forças da gravidade. É, ainda, parte integrante dos seres vivos (PEREIRA, 2022).

##### b) Definição das características do solo.

O solo é um componente vital extremamente peculiar com relação a outros habitats terrestres, em vista de sua natureza heterogênea, complexa e dinâmica (MOREIRA e SIQUEIRA, 2006), além da sua função nos ciclos ecológicos (PELICA, 2017). fornecer um 'habitat' para pessoas, animais, plantas e outros organismos vivos; faz parte de ciclo da água e de nutrientes; fornecendo alguma proteção para as águas subterrâneas (CASTELO-GRANDE, 2010).

O solo é um recurso natural com elevado valor econômico, não renovável à escala humana, cuja contaminação leva a uma desvalorização econômica (GERIM, 2012).

- Barbosa (2014) apresenta as propriedades do solo:

- Cor: É uma característica visual, manifestada pela presença da luz. A coloração pode indicar valores quantitativos, analisados através do catálogo de cores de Munsell.
- Textura: Caracteriza o solo, Segundo a Agência Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), na norma NBR 6502 de 2022, de acordo com o tamanho de suas partículas, podendo ser arenoso, silte ou argiloso.
- Estrutura: Caracterização complementar à textura, refere-se à organização das partículas de silte ou argila ou areia do solo. Organizando em blocos prismáticos, laminares ou granulares.
- pH: A maioria dos solos brasileiros apresenta caráter ácido.

#### 4.2.1.2. ECOTOXICIDADE

A ecotoxicologia é a ciência que estuda os efeitos das substâncias químicas, uma importante ferramenta complementar no monitoramento ambiental. O potencial ecotoxicológico do solo, é demonstrado diante das propriedades físicas, químicas e mineralógicas de substratos pedológicos. A especiação e características do contaminante, o pH do solo, outros íons em solução, os tipos de argilas e superfícies de óxido, a presença de matéria orgânica, a vegetação e as chuvas afetam a disponibilidade do contaminante e seu potencial para causar danos (CUNNINGHAM, 1997).

#### 4.2.1.3. FITOTOXICIDADE (TOXICIDADE E ESTUDOS DE TOLERÂNCIA)

A resistência ou suscetibilidade das plantas a substâncias orgânicas e poluentes inorgânicos no meio ambiente depende de como absorção, localização e/ou metabolismo do poluente é realizado e controlado (DORAN, 2009). A fitotoxicidade e outros fatores de estresse podem limitar severamente o desempenho e o estabelecimento das espécies vegetais utilizadas no processo de remediação (KIDD, 2015).

A escolha do organismo leva em conta sua resistência à toxicidade do poluente, ou seja, sua tolerância refletida pela capacidade de sobreviver em um ambiente que é tóxico para outras plantas da mesma espécie ou de espécies diferentes (MACNAIR, 1999), bem como a capacidade e aptidão a reduzir a ação do poluente (GAYLARDE; BELLINASSO e MANFIO, 2005) através de vários processos biofísicos e bioquímicos naturais: adsorção, transporte e translocação; hiperacumulação; ou transformação e mineralização (MEAGHER, 2000) ou de liberar compostos que afetem a solubilidade e a absorção dos poluentes pela planta (PILON-SMITS, 2005).

Tecnicamente, a tolerância se manifesta como uma interação genótipo x ambiente (MACNAIR, 1999), resultante de diversos mecanismos complexos, nem todos completamente elucidados (MARQUES *et al.*, 2011).

#### 4.2.1.4. CONTAMINANTES

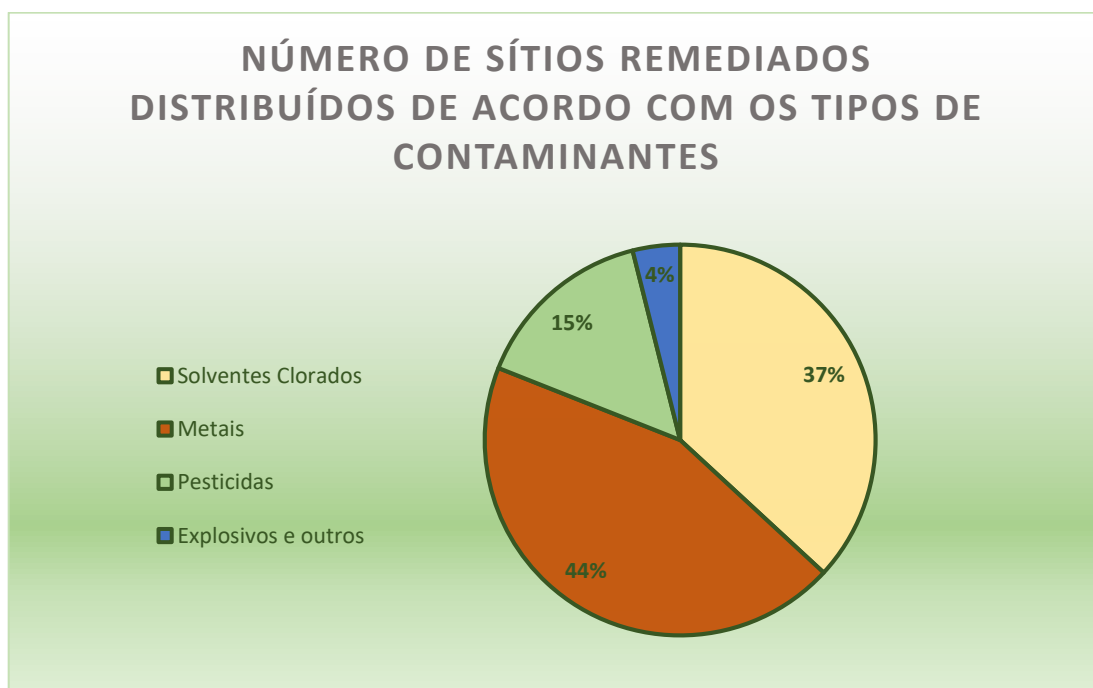
Os alvos da fitorremediação atualmente incluem, hidrocarbonetos de petróleo, pesticidas, explosivos, solventes clorados (CUNNINGHAM, 1997), poluentes elementares como os metais tóxicos e radionuclídeos, como arsênico, cádmio, céσιο, cromo, chumbo, mercúrio, estrôncio, tecnécio, trítio e urânio (MEAGHER, 2000).

**Quadro 2** – Substâncias orgânicas e inorgânicas passíveis de processo de fitorremediação

Substâncias passíveis de processo de fitorremediação	
Orgânicas	Inorgânicas
Solventes Clorados	Metais (B, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn)
Explosivos	Radionuclídeos (Cs, <sup>3</sup> H, Sr, U)
Pesticidas	Outros (As, Na, NH <sub>4</sub> )
Hidrocarbonetos e Derivados de Petróleo	PCBs, óleo, coque, entre outros.

Fonte: (elaborado pelo próprio autor), 2023

A fitorremediação é uma tecnologia de limpeza eficiente para uma variedade de poluentes que contaminam ambientes, contendo poluentes degradáveis e/ou não degradáveis que podem ser tratados por esta técnica (FARRAJI, 2020), podendo ser classificados como orgânicos e inorgânicos (PILON-SMITS, 2005). O autor Landmeyer (2011), aborda o número de sítios remediados em água subterrânea contaminada (Figura 4).



**Figura 4:** Número de sítios remediados distribuídos de acordo com os tipos de contaminantes.

Fonte: adaptado pelo autor (2023) de LANDMEYER, (2011).

#### 4.2.1.4.1. POLUENTES ORGÂNICOS

Poluentes orgânicos são compostos contendo carbono que são principalmente sintéticos, ambientalmente persistente e potencialmente tóxico (FLETCHER *et al.*, 2020), incluem pesticidas, herbicidas, inseticidas organoclorados, bifenilos policlorados (PCBs), herbicidas e vários compostos orgânicos, como os compostos fenólicos, hidrocarbonetos lineares halogenados como o tricloroetileno (TCE) (MEAGHER, 2000), hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs) e nitroaromáticos como o trinitrotolueno (TNT) (WHITE, 2007; MCGUINNESS & DOWLING, 2009; IMRAN *et al.*, 2020) ou Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs) que são vapores emitidos por diversos sólidos, provocando efeitos adversos à saúde a curto e longo prazo.

Podem ser liberados no ambiente via derramamento de combustíveis e de solventes (tricloroetileno), ser decorrente de atividades militares (explosivos e armas químicas) e do uso de pesticidas e fertilizantes na agricultura, ou proveniente de resíduos industriais (químicos e petroquímicos) (PILON-SMITS, 2005).

Todas as substâncias orgânicas naturais são biodegradáveis, mas dependendo das condições ambientais, esses processos naturais podem ser muito demorados de acontecer (ARÉVALO, 2020). Já os compostos orgânicos sintéticos são extremamente resistentes aos processos naturais de degradação e, uma vez libertados no ambiente, podem persistir durante anos e até décadas (MCGUINNESS & DOWLING, 2009). O objetivo da fitorremediação para poluentes orgânicos, é mineralizá-los completamente em constituintes relativamente não tóxicos (CUNNINGHAM, 1996), porém se tem observado que a mineralização pode diminuir diante do tempo de contato com o solo. (TELHADO *et al.*, 2010).

A fitorremediação pode ser aprimorada explorando as interações micróbio-planta, ao influenciar microorganismos que degradam contaminantes orgânicos (GERHARDT, GERWING & GREENBERG; 2017), fornecendo substratos para o crescimento microbiano ou cometabolismo (CUNNINGHAM, 1997), onde os contaminantes que são absorvidos pelas raízes podem ser transformados pela planta e posteriormente redepositado na rizosfera em uma forma química alterada.

#### 4.2.1.4.2. POLUENTES INORGÂNICOS

Os poluentes inorgânicos ocorrem como elementos naturais na crosta terrestre ou na atmosfera. Atividades humanas como mineração, industrialização e agricultura, por exemplo, promovem sua liberação no ambiente (GRANDIN & TECHIO, 2014).

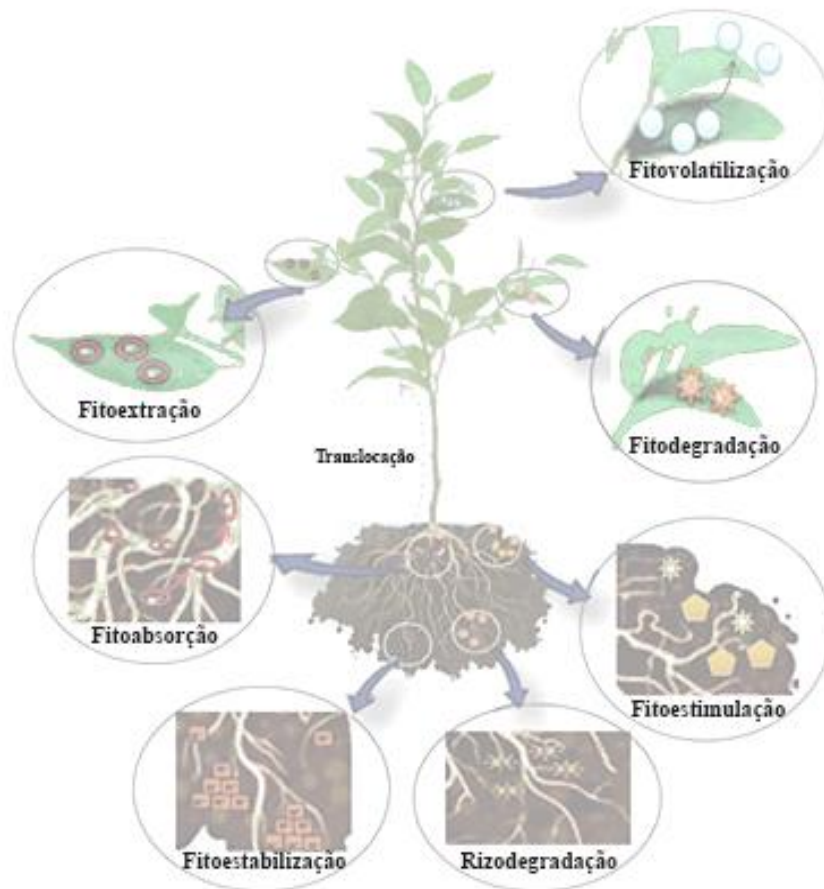
Os poluentes agrícolas inorgânicos incluem principalmente HMs (Heavy metals) como mercúrio (Hg), cádmio (Cd), arsênio (As), cromo (Cr), tálio (Tl), selênio (Se) e chumbo (Pb) (MEAGHER, 2000; IMRAN et al., 2020) e radionuclídeos.

Muitos contaminantes inorgânicos ligam-se firmemente à matriz do solo. Existem poucas opções de remediação para os contaminantes (CUNNINGHAM, 1997), porém do mesmo jeito que os microrganismos podem atuar sobre os poluentes orgânicos, também pode ser efetivo para descontaminação dos metais potencialmente tóxicos presentes no ambiente (ARÉVALO, 2020).

Fitorremediação de contaminantes inorgânicos, incluindo metais(loid)s, sal (principalmente NaCl) e radioisótopos, que não podem ser degradados, são remediados principalmente pela imobilização nas raízes ou pela extração do solo para os tecidos vegetais acima do solo (GERHARDT, GERWING & GREENBERG; 2017).

#### 4.2.2. MECANISMOS FITOTECNOLÓGICOS

As espécies fitorremediadoras podem apresentar diferentes tipos de mecanismos para descontaminação de um área degradada, conforma indica a Figura 5.



**Figura 5** – Mecanismos fitotecnológicos de plantas fitorremediadoras

Fonte: traduzido pelo próprio autor de Shmaefsky (2020)

#### 4.2.2.1. FITOEXTRAÇÃO/FITOACUMULAÇÃO/FITOABSORÇÃO

O objetivo pode ser limpar solos levemente contaminados, removendo o contaminante do local *in situ*, ou biominerar metais de solos altamente contaminados (CUNNINGHAM *et al.*, 1995) através da colheita repetida da biomassa coletável das espécies denominadas “hiperacumuladoras”, isso é mais aplicável quando se tratam de metais que se encontram biodisponíveis e é mais utilizada na remediação da maioria dos MPs (metais pesados) (NOGUEIRA, 2022), portanto, além das plantas hiperacumuláveis, ou seja, que podem acumular grandes quantidades de metais necessários para o seu crescimento, também se pode utilizar espécies halófitas (THAMPATTI *et al.*, 2020) para remover o excesso de sal em solos salinos (MISRA, 2019). Após absorver os contaminantes pelas raízes, as espécies usam proteínas transportadoras, translocando os contaminantes para partes colhíveis das plantas (ERAKHRUMEN, 2007), acumulando nos tecidos foliares ou degradando metabolicamente os contaminantes em solos ou sistemas aquáticos (VAN NEVEL, 2007) através de enzimas exclusivas (BATTY & DOLAN, 2013; MONDAL & PALIT, 2020; SHMAEFSKY, 2020).

#### 4.2.2.2. FITOTRANSFORMAÇÃO/FITODEGRADAÇÃO

A decomposição de contaminantes ou a incorporação dessas moléculas nos tecidos vegetais (ERAKHRUMEN, 2007), é realizada através de processos metabólicos dentro da planta, ou a quebra de contaminantes externos à planta através do efeito de enzimas (THAMPATTI *et al.*, 2020).

#### 4.2.2.3. FITOVOLATILIZAÇÃO

A fitovolatilização explora a transpiração e às vezes a fitotransformação para remover contaminantes do solo e da água (SHMAEFSKY, 2020). Tem por objetivo o uso de árvores e outras plantas em crescimento para absorverem a água juntamente com os contaminantes, (MISRA, 2019), transformando os poluentes em metabólitos (ERAKHRUMEN, 2007), volatilizando os vapores menos tóxicos para a atmosfera, em concentrações comparativamente baixas, através das folhas (MONDAL & PALIT, 2020; NOGUEIRA, 2022) com a ajuda de órgãos de transpiração (MISRA, 2019).

#### 4.2.2.4. FITOESTABILIZAÇÃO

Utilização de plantas para estabilizar e reduzir a mobilidade e biodisponibilidade ou



eliminando os poluentes do ambiente, através da absorção e acumulação nos tecidos vegetais, adsorção nas raízes ou precipitação na zona radicular (CANTONI, 2019; THAMPATTI *et al.*, 2020; MONDAL & PALIT, 2020), evitando assim a sua migração para outros componentes ambientais ou sua entrada na cadeia alimentar (ERAKHRUMEN, 2007). As estratégias de remediação baseadas na fitoestabilização envolvem o uso de plantas, isoladamente ou em conjunto com corretivos de solo, adequado para estabilizar um solo contaminado por metais e contaminantes orgânicos, presentes em baixas concentrações (MISRA, 2019), reduzindo a possibilidade do transporte para o lençol freático, limitando a mobilidade e a biodisponibilidade do metal (MARTIN, 2004)

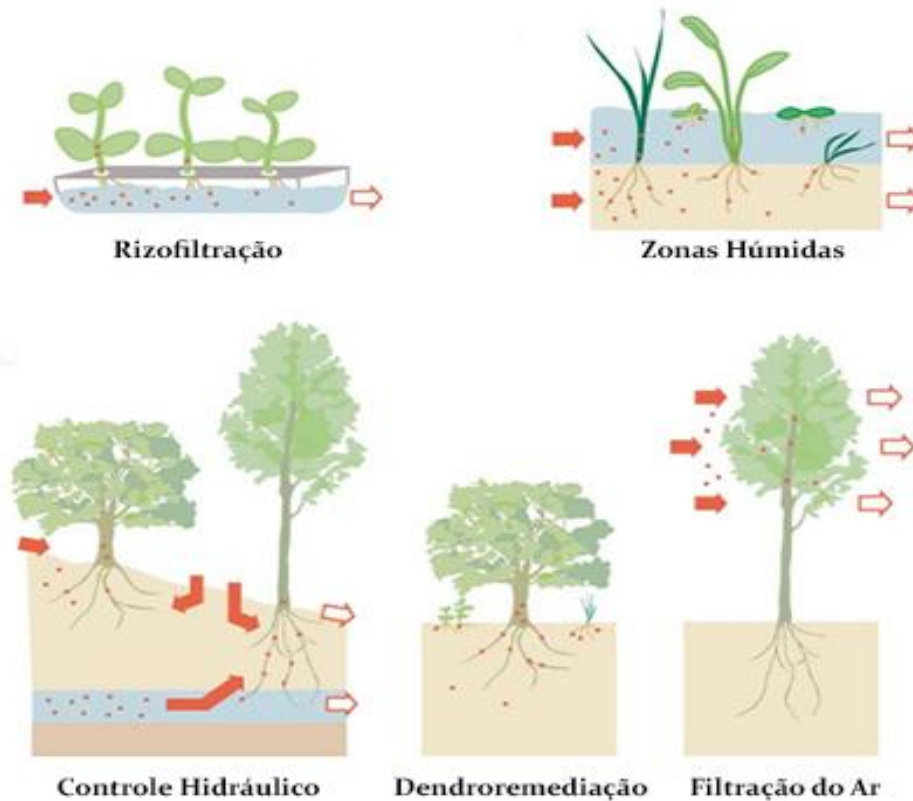
#### 4.2.2.5. RIZODEGRADAÇÃO

A rizodegradação, também chamada de biodegradação aprimorada da rizosfera (THAMPATTI *et al.*, 2020), é um processo que envolve a decomposição de contaminantes na região do solo que é afetada pela presença de raízes, rizosfera, conferindo maior diversidade, número e atividade microbiana (MISRA, 2019; RENER *et al.*, 2022), isto é, as raízes liberam compostos produzidos pela própria planta que tem o potencial de auxiliar na remediação pela atividade biológica existente na rizosfera, entre esses compostos estão alguns ácidos orgânicos, esteróis, nucleotídeos e enzimas (FENG *et al.*, 2017). A rizodegradação, muitas vezes chamada de fitoestimulação, envolve uma relação simbiótica planta-micróbio que aproveita as interações da planta-solo na rizosfera para degradar os contaminantes dentro da rizosfera (BATTY & DOLAN, 2013; SHMAEFSKY, 2020).

#### 4.2.2.6. FITOESTIMULAÇÃO

Biorremediação assistida por plantas envolve uma relação simbiótica planta e fungos ou micróbios, que degrada poluentes orgânicos dentro da rizosfera (BATTY & DOLAN, 2013) na interface solo-raiz, pela liberação de exsudatos/enzimas na zona radicular, estimulando a microbiota presente na rizosfera (ERAKHRUMEN, 2007; MONDAL & PALIT, 2020). Geralmente, a planta não é diretamente envolvida no processo de biodegradação (FRAZAR, 2000), por isso difere-se da rizodegradação.

Alguns autores evidenciam outros mecanismos utilizados pela espécies vegetais para remediação hidráulica e atmosférica, podendo ser utilizadas em consórcios, conforme indica a Figura 6.



**Figura 6:** Outros mecanismos fitotecnológicos.

Fonte: Adaptado pelo autor (2023) de Landmeyer (2011)

#### 4.2.2.7. RIZOFILTRAÇÃO/FILTRAÇÃO ATMOSFÉRICA

A Rizofiltração utiliza as raízes de plantas para absorver/adsorver poluentes, principalmente metais, mas também poluentes orgânicos, de fluxos de resíduos aquosos (ERAKHRUMEN, 2007), águas superficiais contaminadas ou subtratos sólidos, pelas raízes das plantas por adsorção ou precipitação nas raízes das plantas ou absorção seguida de sequestro nas raízes (MISRA, 2019), precipitando contaminantes metálicos (MONDAL & PALIT, 2020; THAMPATTI *et al.*, 2020), enquanto a Filtração Atmosférica é um processo onde é feita a remoção de partículas e poluentes do ar circundante.

#### 4.2.2.8. CONTROLE HIDRÁULICO / WETLANDS (ZONAS HÚMIDAS)

As plantas afetam a hidrologia local pela capacidade da interceptação do sistema radicular e transpiração pelas copas das árvores, com o objetivo de contenção da infiltração e percolação, mediante o controle do fluxo de água (ERAKHRUMEN, 2007). Os choupos e salgueiros da família salicaceae, pertencem a uma classe de árvores amplamente estudadas para essa fitotecnologias, as freatófitas (FRANCESCO, 2011).

#### 4.2.2.9. DENDROREMEDIACÃO

Cultivo em solo poluído a partir de tampão vegetativo, fazendo a combinação do uso de árvores em combinação com gramas, com o objetivo de fitoestabilizar e fitoextrair poluentes do solo (ERAKHRUMEN, 2007). Em termos gerais, as árvores são plantas lenhosas com os sistemas radiculares mais estáveis e maciços, que penetram ainda mais no solo do que a maioria das espécies herbáceas, fornecendo capacidades substanciais de bombeamento de água subterrânea (GONZÁLEZ-OREJA *et al.*, 2008).

### 4.3. APLICABILIDADE DAS FITOTECNOLOGIAS

#### 4.3.1. FITORREMEDIACÃO UTILIZANDO PLANTAS AQUÁTICAS

A fitorremediação aquática é uma fitotecnologia utilizada para a remoção de poluentes de águas superficiais e a restauração de corpos d'água impactados (rios, córregos, lagos, lagoas), em diferentes contextos em termos de pontos tratamento (FLETCHER *et al.*, 2020; THAMPATTI *et al.*, 2020) com potencial de purificação através de um método de baixo custo em rápido desenvolvimento.

Os Leitões Cultivados (Wetlands) é uma tecnologia utilizada em instalações de tratamento de águas residuais, águas descartadas após o uso humano, zonas húmidas especialmente concebidas que utilizam macrófitas aquáticas ou pantanosas (POLINSKA, 2021) para a assimilação dos compostos pelos organismos durante seu crescimento, através do conjunto de técnicas que objetivam a redução do potencial poluidor de um efluente (NISHIMURA, 2020),

Este tratamento ganhou maior ênfase no Brasil em meados da década de 1990, como uma opção promissora e financeiramente viável (CALIJURI *et al.*, 2009). Atualmente existem sistemas wetlands em funcionamento em diversas regiões do Brasil (FAXINA, 2017). Fletcher (2020) explicita alguns deles como, Construção de Zonas Húmidas; Zonas Húmidas de Tratamento Flutuante; Colheita de macrófitas selvagens; e Translocação e armazenamento de elementos em macrófitas.

Esses sistemas podem ser chamados de naturais, pois se baseiam na capacidade de ciclagem dos elementos contidos no efluente sem o fornecimento de qualquer fonte de energia induzida para acelerar os processos bioquímicos, os quais ocorrem de forma espontânea (FAXINA, 2017), a partir de plantas que utilizam nutrientes das áreas inundadas com o efluente a ser tratado para se desenvolverem (MISHIMA *et al.*, 2005).

#### 4.3.2. FITORREMEDIAÇÃO DE POLUENTES AGRÍCOLAS

A utilização dos solos no território brasileiro, desde a colonização, caracterizou-se pela sempre estimulada pela economia cíclica e migratória (AVANZI et al., 2009). Sua contaminação, é desencadeada pelo rápido e, por vezes, irracional desenvolvimento humano, o qual impacta negativamente a qualidade e quantidade dos alimentos (NOGUEIRA, 2022), podendo ser encontrados campos contaminados com pesticidas em todo o mundo devido ao uso excessivo agroquímicos (EEVERS et al., 2017; MELNIKOV, 1971).

O uso de agroquímicos incluindo organofosforados e organoclorados, tem aumentado continuamente desde a Segunda Guerra Mundial (EDWARDS, 1989), tendo sido utilizados em todo o mundo na produção agrícola nas últimas décadas (CHEN-JING LIU et al., 2023), pois a agricultura enfrenta agora uma pressão considerável para aumentar a produção para alimentar uma população humana cada vez maior, que deverá aumentar para 9 mil milhões até 2050 (MATHEWS, 2016), em consequência, o uso de herbicidas está aumentando na produção agrícola mundial (GIANESSI, 2013), em decorrência do uso intensivo na agricultura em culturas de milho, cana de açúcar, soja, batata (COLLA et al, 2008).

Um pesticida pode ser definido como qualquer substância ou mistura de substâncias utilizadas para destruir, erradicar, controlar ou alterar o ciclo de uma determinada praga (CASTELO-GRANDE, 2010), classificados com base em seus usos e manuseio. As principais classes de pesticidas são: inseticidas (contra insetos), herbicidas (contra plantas), fungicidas (contra fungos) (EEVERS et al., 2017) acaricidas (contra ácaros), arboricidas (contra arbóreas), bactericidas (contra bactérias), algicidas (contra algas), nematicidas (contra nematóides) e roenticidas (contra roedores) (CASTELO-GRANDE, 2010; MELNIKOV, 1971).

Duke (1990) relatou diversos mecanismos de ação dos herbicidas, como, por exemplo, biossíntese de aminoácidos, como os glifosatos; fotossíntese, como as triazinas, tipos diuron, inibidores da fotossíntese II; biossíntese de lipídios, divisão celular; fotobranqueadores das folhas; e moléculas que atuam em outros sítios, inibindo funções vitais.

Vários pesquisadores estudaram os efeitos tóxicos dos herbicidas no ecossistema (BUCHANAN et al., 2009). A destruição de plantas forrageiras por herbicidas é um fator importante nessa situação (JOHANSEN, 1977), portanto, por serem projetados para matar plantas, o uso da fitorremediação para remediá-los pode ser uma tarefa difícil e complicada, mesmo assim, diversos trabalhos na literatura observaram a redução na concentração de pesticidas no solo empregando fitorremediação (PIRES *et al.*, 2003; 2005a,b; 2008; CARMO *et al.*, 2008; MADALÃO *et al.*, 2013; MELO *et al.*, 2017). Neste sentido, o Brasil, um país com

extensas áreas agrícolas, deve avançar tanto no uso correto dos agroquímicos, quanto na degradação destes em solos e águas, visando à descontaminação dos mesmos e à geração de alimentos mais seguros para o consumo (LEONEL, 2018).

Embora os pesticidas constituam um aspecto importante da tecnologia da agricultura moderna, a sua utilização excessiva e persistente resulta em danos às terras agrícolas (MORILLO, 2017), causando efeitos adversos notáveis no ambiente, devido à sua elevada persistência e toxicidade para organismos não-alvo, incluindo os seres humanos (IMRAN *et al.*, 2020; QU – 2021), representando uma grave ameaça para a saúde humana. Os pesticidas agravaram consideravelmente os problemas de envenenamento por abelhas e de polinização.

#### 4.3.3. FITORREMEDIAÇÃO DE METAIS IN SITU

A presença de metais nos solos agrícolas é algo natural, pois é resultante do intemperismo das rochas matrizes dos solos e erupções vulcânicas (NOGUEIRA, 2022). Os metais são essenciais para o desenvolvimento e crescimento das plantas como - cobre (Cu), magnésio (Mn), ferro (Fe), zinco (Zn), molibdênio (Mo) e possivelmente níquel (Ni) — entre outros com função ainda desconhecida - cádmio (Cd), cromo (Cr), chumbo (Pb), cobalto (Co), prata (Ag), selênio (Se), mercúrio (Hg) (GARBUSU, 2002) - que algumas espécies vegetais possuem a capacidade de remediar.

Contudo, atividades antropogênicas acentuam a concentração dos MPs (NOGUEIRA, 2022) sobre o ecossistema, atividades socioeconômicas e saúde humana, portanto há o interesse no desenvolvimento de estratégias de remediação, as quais visam reduzir a concentração, a toxidez e os riscos de poluições (PEREIRA, 2022).

A poluição do meio ambiente por metais pesados é um sério problema. Tratamentos avançados incluem lavagem do solo ou eletroosmose. Outra forma ecologicamente para solucionar o problema é a a fitoextração, através da absorção pelas raízes, transporte e concentração na parte aérea (CANTONI, 2019).

A taxa de absorção de metais tóxicos no solo pelas raízes de plantas terrestres é tipicamente baixa (BLAYLOCK, 1999), e a remoção dos contaminantes fica delimitada pela extensão do sistema radicular (MANZINI, 2011), sendo necessário o desenvolvimento de pesquisas para encontrar uma forma de imobilizar de forma definitiva os poluentes presentes em suas raízes, garantindo resultados eficientes. Nogueira (2022), conclui que a fitorremediação é uma técnica potencial e de fácil aplicabilidade para descontaminação e conservação de solos poluídos com MPs em áreas agrícolas brasileiras, utilizando espécies denominadas

(hiper)acumuladoras de metais, que apresentam capacidade de hiperacumular em seus tecidos e tolerar concentrações anormalmente altas de alguns elementos tóxicos (MELO, 2006), como os metais, essenciais em processos biológicos que deslocam íons metálicos, incluindo cádmio, zinco, mercúrio, cobre, chumbo e níquel (PRASAD, 2002), entre outros como o arsênio e selênio.

A fitoextração foi originalmente aplicada quase exclusivamente a metais pesados em solos, pela capacidade das plantas absorverem e acumularem os MPs em seus órgãos aéreos (NOGUEIRA, 2022), mas desde então passou a ser aplicado a muitos outros materiais (CUNNINGHAM, 1997). Este processo de extração, acumulação e concentração de metais no tecidos vegetais acima do solo, permite que as plantas sejam usadas como parte de uma tecnologia de limpeza do solo (BLAYLOCK, 1999). A Fitoestabilização é utilizada na remediação de Pb, As, Cd, Cr, Cu e Zn -, diminuirão a mobilidade e a biodisponibilidade dos MPs presentes na rizosfera, por meio da precipitação, sorção, complexação ou alteração da valência dos elementos (NOGUEIRA, 2022). O mecanismo 'fitovolatilização' é utilizado na remediação de Hg, Se e As, absorvendo e convertendo os poluentes em formas voláteis menos tóxicas e, após isso, realizar a sua liberação à atmosfera por meio da transpiração (NOGUEIRA, 2022).

Em vista disso, é imprescindível distinguir a fitorremediação realizada nos tecidos vegetais e a rizorremediação na rizosfera, recentemente estudada diante das observações e descobertas do relacionamento em que a microflora possui com as raízes através da rizosfera, zona de interação planta-solo, acompanhada ao desempenho dessas espécies vegetais para limpeza de áreas contaminadas. Diversos autores afirmam a possibilidade dos microorganismos incorporados à rizosfera, alterarem a mobilidade, a biodisponibilidade e a absorção de contaminantes orgânicos e inorgânicos (GERHARDT, 2015; ROBINSON, 2009; VAMERALI, BANDIERA e MOSCA, 2009; CABELLO-CONEJO, 2014; MENCH e KIDD, 2015; WHITING, 2001; MA, 2011).

#### 4.3.4. FITORREMEDIAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS POR HIDROCARBONETOS

A contaminação do meio ambiente por hidrocarbonetos tem sido objeto de grande preocupação, pois estes podem vir a contaminar o subsolo e comprometer os ecossistemas. No Brasil há uma ausência de regulamentação sobre a poluição ambiental causada pelo petróleo e seus derivados, (TELHADO *et al.*, 2010), poucos estados possuem legislação e o seu tratamento é considerado de forma secundária, o que dificulta uma integração entre o desenvolvimento da atividade petrolífera no país e a conservação da qualidade do solo e das águas subterrâneas (MACHADO *et al.*, 2013), ocasionando eventualmente impactos negativos no meio ambiente,

na economia e na sociedade, quando em acidentes a limpeza imediata é dificultada por aderirem ao solo (LIM, 2016).

Os hidrocarbonetos contêm hidrogênio e carbono, consistem em uma mistura complexa de diferentes contaminantes orgânicos, incluindo alcanos, cicloalcanos, hidrocarbonetos aromáticos e outros contaminantes orgânicos (CHEN-JING LIU *et al.*, 2023), hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH) e hidrocarbonetos halogenados, introduzidos no meio ambiente a partir do diesel, petróleo bruto, petróleo, betume, óleo lubrificante, óleo de bunker, entre outros tipos de óleo (LIM, 2016).

Recentemente foram publicados varios estudos sobre o uso de fitorremediação para degradar compostos de hidrocarbonetos, incluindo compostos recalcitrantes como PAH e PCBs, compostos aromáticos sintéticos tóxicos conhecidos pela sua persistência e potencial toxicidade, podendo bioacumular no meio ambiente. McGuinness & Dowling (2009) relataram que embora a fabricação de PCBs tenha sido proibida, devido a sua persistência, eles continuam sendo um problema ambiental por terem sido utilizados de forma extensiva pelas indústrias no século XX.

Gerhardt, Gerwing e Greenberg (2017), notaram que há uma preponderância de artigos de periódicos sobre fitorremediação de metais, em vez de produtos orgânicos como PHC e PAHs, portanto, além de tratamento de metais pesados, a fitorremediação também tem sido utilizada para o tratamento de hidrocarbonetos e derivados tóxicos do petróleo (BTEX; PAH; PHC e PCBs). (BOONSANER *et al.*, 2011).

Podem ser encontrados no meio ambiente como gases (por exemplo, metano e propano), gotículas, líquidos (por exemplo, hexano e benzeno), ou pequenas partículas, ceras ou sólidos de baixo ponto de fusão (por exemplo, cera de parafina e naftaleno), ou polímeros (por exemplo, polietileno, polipropileno e poliestireno) (MCGUINNESS & DOWLING, 2009).

#### 4.4. BENEFÍCIOS E LIMITAÇÕES

A fitorremediação é uma tecnologia de limpeza esteticamente agradável e de fácil implementação para remediação no local, in-situ, baseada na energia solar que apresenta diversas vantagens. A aplicação deste método apresenta ótima relação custo-benefício e perturbação ambiental mínima onde as plantas atuam como estabilizadores do solo e minimizam a quantidade de poeira contaminada que poderia sair do local e entre em bairros vizinha, portanto, possui alta probabilidade de aceitação pública (CHANDRA, 2018). O presente artigo, descreveu o potencial da fitorremediação para fornecer soluções de remediação eficientes, multi-alvo e sustentáveis para ambientes poluídos, destacando o potencial dessa inovadora tecnologia ecológica movida a

energia solar, que mesmo relativamente recente, possui boa aceitação pública.

O tratamento *in situ* apresenta fácil monitoração e não se limita ao tamanho do site, podendo ser facilmente usado em qualquer área que suporta o crescimento das plantas (LIM, 2016) para remediar o solo superficial, verificando eficiência em locais com níveis baixos de diversas classes de contaminantes (BERNARDINO, 2016). Seu potencial em operações de limpeza em grande escala é muito maior do que é possível com outros métodos, possui custos mínimos de manutenção e evita escavações, tráfego intenso (CHANDRA, 2018) e transporte do solo, causando menos perturbações aos ecossistemas do que a remediação física, química ou microbiana (DORAN, 2009). As plantas podem ser facilmente cultivadas sem muito esforço e monitoradas visualmente, ao contrário da biorremediação com micróbios, analisadas através das amostras de tecido vegetal e testadas quanto à presença do poluente ao longo do tempo.

De acordo com Jiang *et al.* (2015), a fitorremediação nas suas várias práticas poderá levar ao retorno de capital de formas distintas:

- A matéria vegetal poderá ser usada para fins energéticos;
- Para contenção de riscos;
- Extração e recuperação de metais valiosos (fitomineração);
- Contribuindo para a diminuição da lixiviação, devido ao aumento da evapotranspiração e do controle da erosão do solo (MANZINI, 2011);
- Contribui positivamente em termos de paisagismo e impacto ambiental favorável (BERNARDINO, 2016);
- Aumentando a fertilidade/qualidade do solo (ODOH *et al.*, 2019) e conseqüentemente o aumento do preço do solo (JIANG *et al.* 2015).

A fitorremediação também fornece habitat para a vida selvagem entre outras vantagens em relação aos métodos de engenharia ou biorremediação, incluem a possibilidade de um produto útil, como madeira, celulose ou bioenergia, modificações genéticas, mecanismos alelopáticos ou cedendo nutrientes para microrganismos rizosféricos que também podem ajudar na remediação dos poluentes (CHANDRA, 2018).

No entanto, a fitorremediação é limitada por uma série de fatores, por exemplo, os metais tóxicos ou produtos químicos persistentes absorvidos pelas plantas, podem ser perigosos para a biota, como risco de contaminação da cadeia alimentar através da bioacumulação (CASTELO-GRANDE, 2010; CHANDRA, 2018). O tratamento exige longo tempo e é necessário o levantamento de informações como a especificidade do local/contaminante (JIANG, 2015), devido a problemas de adaptabilidade ambiental, limitação de nutrientes, resistência à toxicidade e biodisponibilidade limitada de contaminantes e fitotoxicidade (CHEN-JING LIU *et al.*, 2023),



relacionada às concentrações de metais pesados e a presença de outras toxinas que devem estar dentro dos limites de tolerância das plantas (SIRGUEY E OUVRARD, 2013; CHANDRA, 2018)

Apesar destas limitações, muitas formas de fitorremediação surgiram nos laboratórios e estão atualmente em prática (CUNNINGHAM, 1997), os vegetais que se mostram promissores no laboratório/estufa devem ser testados no campo, onde variáveis ambientais podem levar a resultados diferentes (BRUNETTI, 2011; BURGES, 2016).

Diversas pesquisas para fitorremediação, Watt (2007), verifica potencial na fitorremediação radionuclídeos, em número de elementos que incluem os isótopos U, Sr e Cs; para contaminantes de POPs, PCBs (WHITE, 2007); e Singh (2007), ratifica a possibilidade de algumas plantas com características hiperacumuladoras, estabilizar e acumular os metais, como o Arsenio, em solos contaminados. Porém a fitoestabilização depende de plantas que tenham a capacidade de estabilizar ou imobilizar metais em solos (BATTY & DOLAN, 2013; SHMAEFSKY, 2020) e o acesso ao local deve ser controlado, pois as plantas podem ser prejudiciais ao gado e o público em geral (CHANDRA, 2018).

No entanto, esta técnica também apresenta algumas limitações, principalmente por estar relacionada à profundidade e ao tempo gasto (MOSHINA, 2005). Considerada uma solução a longo prazo, um processo demorado que pode levar estações de cultivo para limpar um sítio, apontada geralmente como mais lenta em comparação com técnicas tradicionais de engenharia, que podem ser muito mais rápidas (BERNARDINO, 2016), pois a fitorremediação é um processo remediador com propriedades climático dependentes das características sazonais e do substrato, incluindo o fornecimento adequado de água e nutrientes, textura, pH e salinidade (SIRGUEY E OUVRARD, 2013). Lim (2016), aponta diversos parâmetros externos que podem afetar o sucesso da fitotecnologia, como os tipos e características das plantas, resistência das plantas aos efeitos fitotóxicos, a necessidade de um plano específico que aborde as especificidades do contaminante e do local, a ecotoxicidade do meio, entre outros fatores que podem afetar o crescimento das plantas.

Dessarte, as condições ambientais também determinam a eficiência da fitorremediação, conforme evidenciam Sirguy e Ouvrard (2013), Lim (2016) e Chandra (2018), pois a sobrevivência e o crescimento das plantas podem ser afetados negativamente pela toxicidade e condições gerais dos locais contaminadas e além disso, o desenvolvimento de algumas espécies de plantas com baixos rendimentos de biomassa e sistemas radiculares reduzidos não suportam as condições e muito provavelmente não são eficientes, nem evitam a lixiviação de contaminantes em sistemas aquáticos.

A fitorremediação, definida como o uso da vegetação para tratamento *in situ* como meio

exclusivo ou suplementar de remediar a poluição do solo e da água é muito promissora para países com economias emergentes, bem como para países economicamente favorecidos (SHMAEFSKY, 2020). É uma biotecnologia ambiental que tem atraído recentemente o interesse de investidores do setor privado, de cientistas, da opinião pública, reguladores e administração pública. Educar os setores público e privado sobre a fitorremediação é crucial (GERHARDT, GERWING & GREENBERG; 2017).

Torna-se necessário um levantamento das espécies, pois existem diversas plantas que podem ser empregadas em pesquisas científicas, somados a integração de diversas áreas de pesquisa para estudos subsequentes para o aprofundamento e identificação dos mecanismos de remediação de cada espécie e avaliar o sítio e sua capacidade remediadora diante da exposição aos contaminantes, contribuindo para o aproveitamento e avanços da nova tecnológica para a limpeza de locais contaminados, representando oportunidade de desenvolvimento de tecnologias nacionais. Há de se considerar que, provavelmente, algumas espécies ainda não estudadas da Mata Atlântica possuem potencial fitorremediador para poluentes. Grandin & Techio (2014), citam algumas plantas mais estudadas por autores na nossa literatura nesta questão, como o cedro (*Cedrela fissilis*) e o ipê-roxo (*Handroanthus impetiginosus*). Portanto as barreiras e os preconceitos acerca das leis e regulamentos ambientais também favorecem as técnicas tradicionais em relação às inovações, como a fitorremediação por parte das agências reguladoras (MARQUES et al., 2011).

#### 4.5. SELEÇÃO DE PLANTAS

Diversos autores evidenciam a seleção de plantas remediadoras como uma etapa altamente importante pois o sucesso da fitorremediação depende, antes de tudo, da seleção criteriosa das espécies vegetais (COOK, 2013; ROBINSON, 2009; MENCH, 2009; KIDD, 2015), tendo em vista que nem todas desenvolvem-se em ambientes contaminados e além de apropriadas às condições locais, precisam ser tolerantes ao contaminante (MARQUES et al., 2011).

Mais de 400 espécies de plantas são capazes de remediar solos e águas contaminadas (GHOSH et al., 2023) desenvolvendo características adaptativas para tolerância, absorção, transferência e degradação de contaminantes, como metais pesados, petróleo bruto, compostos clorados, compostos orgânicos e radionuclídeos, explosivos, PAH e pesticidas (RAJIV et al., 2009), portanto a eficiência de absorção desses compostos pela planta é determinada por muitas características do solo e da planta (HUSSAIN, 2009).

Visando a seleção de plantas para a remediação de determinado ambiente, torna-se importante o levantamento que dispõem a relação de espécies vegetais eficientes, as características do bioma de origem, dos contaminantes (CARVALHO, 2023) e do desenvolvimento das plantas fitorremediadoras quanto a adaptação local, metabolismo, absorção e tolerância (KARTHIEKEYAN, 2004).

A seleção das espécies de plantas apropriadas com qualidades específicas que as tornam boas candidatas à fitorremediação, é um processo crítico para o sucesso desta tecnologia (ARTHUR, RICE & BALADI et al., 2005). Portanto podem carecer de outras características que possam ser exigidas (GERHARDT, GERWING & GREENBERG; 2017). Diante disso, este critério requer conhecimentos básicos de química do solo, microbiologia do solo, biologia vegetal, ecologia e engenharia ambiental, conforme o esquema apresentado na Figura 7 (ALI *et al.*, 2013).



**Figura 7:** Esquema mostrando a natureza interdisciplinar da pesquisa em fitorremediação.

Fonte: Traduzido pelo autor (2023) de ALI (2013).

Uma base técnica para a tomada de decisões é de importância crítica para a comunidade de pesquisa e desenvolvimento envolvida com fitorremediação (CUNNINGHAM, 1997). Para isso Wang (2007), adaptado por Gerhardt (2017), determinou que a planta deve ter tais características.

- (1) um sistema radicular altamente desenvolvido e densamente compacto, com a capacidade de secretar uma quantidade substancial da enzima que pode tornar os poluentes inofensivos;

- (2) tolerância aos poluentes na concentração encontrada no solo, bem como co-contaminantes;
- (3) crescimento rápido e elevada produção de biomassa (grande tamanho);
- (4) capacidade de crescer em solos pobres.

Dessa forma para que as plantas possam ser utilizadas como agentes de despoluição, é desejável que as espécies indicadas como fitorremediadoras, apresentem crescimento rápido, elevada produção de biomassa, competitividade, vigor e tolerância à poluição (LAMEGO *et al.*, 2007), por isso as gramíneas têm sido o agente fitorremediador mais amplamente estudadas. Isso se deve à sua alta biomassa, rápido crescimento, forte resistência e aplicabilidade na remediação de diversos tipos de solo (ELEKES, 2014), comumente usadas para fitorremediação e degradação de PHC e PAHs totais (COOK, 2013). Atualmente, muitas pesquisas de fitorremediação para solos contaminados com compostos orgânicos analisam o efeito das espécies de Poaceae na remoção de contaminantes (HALL *et al.*, 2011) e de Fabacea, como o Feijão guandu (*Cajanus cajan*), uma forrageira, utilizada com fins medicinais, na agricultura, como planta melhoradora de solos e fitorremediadora na recuperação de áreas degradadas (AGUIAR 2023).

Para a eficiência do processo que o mesmo esteja bem adaptado às condições ambientais que prevalecem nesses locais (GOLDSBROUGH, 1999), o sucesso das fitotecnologias dependem da aplicação de técnicas agrônômicas apropriadas e da seleção de plantas adequadas com diferentes finalidades, podendo acumular poluentes em seus tecidos, permitindo a extração após o desenvolvimento do indivíduo, a degradação de contaminantes em processos metabólicos e também a volatilização de poluentes para a atmosfera (NISHIMURA, 2020).

#### 4.6. POTENCIAL DE ESPÉCIES NATIVAS FITORREMEIADORAS

O Brasil, por ser um país de clima tropical caracterizado por diversos tipos de solo, devido às diferenças no relevo, clima, material de origem, vegetação, matéria viva e enorme biodiversidade, apresenta grande potencial para o uso da fitorremediação (MARQUES *et al.*, 2011; BARBOSA, 2014), a busca e o reconhecimento de plantas adaptadas ao clima e ao solo e que sejam eficientes para descontaminação é importante para se ter mais opções no momento de seleção do vegetal, portanto ao selecionar as espécies de plantas a serem cultivadas, deve-se ter cuidado para evitar a introdução desnecessária de espécies de plantas não nativas e, principalmente, de espécies de plantas invasoras (KIDD, 2015).

A utilização de espécies nativas para a fitorremediação seria a melhor forma de reduzir o

risco ecológico (IMRAN *et al.*, 2020), podendo servir a um duplo propósito de remediação e de restauração ecológica (FUTUGHE, 2020), seja de âmbito local e regional, deve-se ao fato de que elas já estão adaptadas ao clima e as propriedades químicas do solo (PEREIRA, 2022). Isso aumenta as opções de selecionar plantas nativas para realizar a fitorremediação de forma mais eficaz do que as introduzidas plantas não totalmente aclimatadas ao local de remediação, como é evidente nos estudos da fisiologia vegetal (de MELLO-FARIAS *et al.* 2011).

**Quadro 3** - Alguns méritos das plantas nativas sobre as plantas não nativas na fitorremediação

Espécies de Plantas Nativas	Espécies de Plantas Não Nativas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mais econômico, pois o replantio pode não ser necessário</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incurrir em custos adicionais devido ao plantio, irrigação, fertilização e tratamentos com pesticidas</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pouca ou nenhuma perturbação do solo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perturbação mínima do solo</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resulta na remediação do local e na restauração ecológica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não conduzem à restauração ecológica por si só</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inclui características ecológicas de valor social e estético, recuperação da qualidade do solo, funcionalidade e sustentabilidade</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muitas vezes carrega a carga potencial de risco ecológico ao deslocar ou hibridizar com espécies nativas</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geralmente não representam risco ecológico, pois são ecologicamente corretos e autossustentáveis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Os riscos ecológicos precisam ser minimizados; por exemplo, os genes podem ser introduzidos para impedir a propagação ou para tornar-se uma espécie excessivamente sensível a estressores abióticos, como mudanças de temperatura ou produtos químicos. Ou impedido de competir com sucesso fora do local contaminado</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geralmente se adaptam a estressores como variação de temperatura, nutrientes, precipitação, herbivoria, patógenos de plantas, competição por espécies de ervas daninhas, etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geralmente afetado por estressores como variação de temperatura, nutrientes, precipitação, herbivoria, fitopatógenos, competição por espécies de ervas daninhas que se adaptam melhor ao local</li> </ul>

Fonte: Retirado de FUTUGHE (2020); traduzido pelo próprio autor (2023).

O uso de plantas nativas tanto para revegetação quanto para fitorremediação é altamente desejável (FARRAJI, 2020), pois eles têm máxima adaptabilidade às condições ambientais locais

e recebendo a manutenção, o manejo adequado da área após a implantação (CHANDRA, KUMAR, 2017) para assegurar a sobrevivência e o crescimento da vegetação e melhorar a estética do local (MELO, 2006), apresentando como vantagem a diversidade florística e funcionalidade, podendo ser mais eficaz e eficiente do que suas contrapartes não-nativas, e é ecologicamente mais seguro, mais barato, esteticamente agradável, socialmente aceitável e mais fácil de cultivar (FUTUGHE, 2020). Para isso, no Apêndice I, foi feito um levantamento de espécies da Mata Atlântica com ocorrência no estado do Rio de Janeiro (RJ).

#### 4.7. LEGISLAÇÃO

Diversas conferências, eventos e iniciativas internacionais, após a década de 1970, têm sido realizadas para auxiliar e divulgar conceitos importantes que permitam um melhor entendimento do planeta em que vivemos e criar políticas públicas para o desenvolvimento sustentável dos recursos naturais, capaz de assegurar condições dignas às futuras gerações humanas e demais formas de vida. (MACHADO *et al.*, 2013). A primeira lei que se remete quando falamos de direito ambiental no Brasil, é o Art. 225 da Constituição Federal que garante direito a toda população ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, e que é dever do poder público e à coletividade de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.

No Brasil existe uma Política Agrícola, Lei n° 8.171/91 (BRASIL, 1991), onde um dos seus objetivos é o de proteger o meio ambiente, garantir o seu uso racional e estimar a recuperação dos recursos naturais, compreendendo os processos físicos, químicos e biológicos, onde os recursos naturais envolvidos devem ser utilizados e gerenciados, subordinando-se às normas e princípios de interesse público, de forma que seja cumprida a função social e econômica da propriedade.

Para que a exploração do solo ocorra de forma sustentável e econômica, foi sancionada a Lei n° 6.225/75 (BRASIL, 1975), que teve como objetivo, direcionar a sua ocupação e uso em relação ao cenário agrícola e agora vigorando o Programa Nacional de Bacias Hidrográficas e Conservação de Solos na Agricultura, desde o extinto Programa Nacional de Microbacias Hidrográficas e Conservação dos Solos na Agricultura (PNCS) de 1975, para a conservação dos recursos naturais.

A Resolução CONAMA N° 05/1995 delibera a composição de entidades e ministérios para arbitrar sobre assuntos jurídicos, controle ambiental, ecossistemas, energia, gerenciamento costeiro, mineração e garimpo, recursos hídricos e saneamento, recursos naturais renováveis, transportes e uso do solo, considerando a necessidade de dinamizar a implementação da Política

Nacional do meio ambiente, para examinar projetos e anteprojetos de leis, decretos e outros instrumentos normativos que competem a implementação de atividades e responsabilidades impostas aos órgãos que integram o Sistema Nacional do Meio Ambiente – SISNAMA por força da Legislação Federal.

O primeiro instrumento jurídico de tutela das águas no Brasil foi o Código das Águas de 1934 (BRASIL, 1934b). Sessenta e três anos mais tarde promulgou-se a Política Nacional dos Recursos Hídricos – PNRH (BRASIL, 1997), e em 2000, através da disposição da Lei nº 9.984/00 (BRASIL, 2000), criou-se a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA (ANA, 2004) com função de executar a PNRH.

A maior parte da regulação existente no Brasil para salientar a prevenção, controle e fiscalização dos recursos naturais versa sobre a poluição hídrica, como, por exemplo, a Lei do óleo 9.966/2000 e diversas outras resoluções do Conama para protecionismo das águas (Resoluções CONAMA 269/2000, 357/2005, 393/2007, 396/2008, 398/2008 e 430/2011, entre outras) e em relação à proteção do ar (Resoluções CONAMA 403/2008, 432/2011, 433/2011, entre outras). Diligenciando a proteção e conservação do solo e dos recursos hídricos, a Instrução Normativa ICMBIO nº 11, de 11 de dezembro de 2014, estabelece exigências mínimas e norteia a elaboração de Projetos de Recuperação de Áreas Degradadas ou Perturbadas – PRAD; com atenção especial à proteção e conservação do solo e dos recursos hídricos.

Na legislação ambiental federal do Brasil e do Estado de São Paulo, o termo mais aplicado e claramente definido é "poluição", enquanto o emprego do termo "contaminação" é limitado a algumas citações, como, por exemplo, na Lei 6.134/88, que dispõe sobre a preservação dos depósitos naturais de águas subterrâneas do Estado de São Paulo; no seu artigo 4º, é citado que "os órgãos estaduais competentes manterão serviços indispensáveis à avaliação dos recursos hídricos do subsolo, fiscalizarão sua exploração e adotarão medidas contra a contaminação dos aquíferos e deterioração das águas subterrâneas"

A Lei 997/76, que dispõe sobre a instituição do sistema de prevenção e controle da poluição do meio ambiente no Estado de São Paulo, apresenta a seguinte definição para o termo "poluição": "Considera-se poluição do meio ambiente a presença, o lançamento ou a liberação, nas águas, no ar ou no solo, de toda e qualquer forma de matéria ou energia, com intensidade, em quantidade, de concentração ou com características em desacordo com as que forem estabelecidas em decorrência dessa lei. O Art. 54 da lei 9.605 da Seção III; sobre a Poluição e outros Crimes Ambientais, como qualquer causa ou indício de poluição de qualquer natureza em níveis tais que resultem ou possam resultar em danos à saúde humana, ou que provoquem a mortandade de animais ou a destruição significativa da flora:

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e o Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM) estabelecem parâmetros para o lançamento de águas residuais com a Resolução N° 430 de 2011; e na Resolução N°420, sobre a necessidade de prevenção da contaminação do solo e de proteção das águas, delimitando uma concentração limite de contaminantes pré-estabelecidos como “ponto de partida” de investigação em áreas agrícolas, baseando-se em valores considerados deletérios aos humanos.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. RESOLUÇÃO N° 420, DE 28 DE DEZEMBRO DE 2009.

Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas.

Nela são minimamente definidos os critérios de amostragem, porém, claramente definidos os métodos de extração e determinação de dezenas de elementos químicos considerados tóxicos ou potencialmente tóxicos, no solo e em águas subterrâneas, estabelecendo, dentre outras, as classes de qualidade dos solos, de acordo com a concentração de substâncias químicas, o gerenciamento de áreas contaminadas e metodologias, diante do conhecimento histórico e características da área, o tipo de instalação que funcionava anteriormente no local e, também por uma inspeção in loco.

As regulamentações que limitam o descarte de produtos químicos e o aumento dos custos dos tratamentos físicos e químicos tornam tecnologias de biorremediação mais atraentes (MEGHARAJ, 2011) para a gestão ambiental dessas áreas contaminadas (CONAMA 2009) e pela sua fitorremediação (CONAMA 2014), que dispõe na Resolução CONAMA 463/2014, sobre o controle ambiental de produtos destinados à remediação, apresentando definições para “remediador”, “biorremediador”, “bioestimulador”, “remediador químico ou físico-químico”, “fitorremediador”, “agente de processo físico”, “responsável técnico”, “registrante”, dispensando a obtenção de registro para os bioestimuladores e os fitorremediadores, desde que não compostos por espécies exóticas.

De acordo com Cunningham (1997), o termo “remediação” muitas vezes tem mais uma conotação jurídica do que técnica. A remediação pode implicar em:



a) "limpeza" onde o contaminante é removido da matriz (lixiviação, biorremediação, etc.) ou toda a matriz contaminada é removida do sítio

b) "estabilização" onde a forma física ou química da matriz ou contaminante é transformada em uma condição mais inerte

Os primeiros passos em direção a um Gerenciamento de Áreas Contaminadas, no Brasil, foram elaborados pela CETESB, através do GAC - Gerenciamento de Áreas Contaminadas, definido como uma "atuação interdisciplinar, interinstitucional e integral dos órgãos competentes no trato do problema ambiental gerado pelas áreas contaminadas (HANSEN, 2012).

Com base na Lei Estadual nº 13.577/2009 e em seu Regulamento, aprovado pelo Decreto nº 59.263/2013, a Diretoria Plena da CETESB aprovou a Decisão de Diretoria nº 038/2017/C, a qual contém os seguintes procedimentos que passaram a vigorar após sua publicação no Diário Oficial do Estado, ocorrida em 10 de fevereiro de 2017:

- Procedimento para a Proteção da Qualidade do Solo e das Águas Subterrâneas
- Procedimento para Gerenciamento de Áreas Contaminadas
- Diretrizes para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas no Âmbito do Licenciamento Ambiental

A fitorremediação tem potencial para tratar muitos dos locais urbanos e industriais que contêm concentrações de metais acima dos limites de ação exigidos (BLAYLOCK, 1999). Porém a precariedade dos marcos regulatórios, bem como a falta de investimento em pesquisas, tem sido apontada como fatores limitantes que dificultam o impulso da fitorremediação como frente ativa da bioeconomia no Brasil (LABUTO & CARRILHO, 2016).

## 5. DISCUSSÕES

Considerando o aumento populacional, a maior demanda por recursos e produção de alimentos, somados aos avanços industriais, a poluição ambiental afeta tanto as nações desenvolvidas como os países em desenvolvimento. Com a descoberta de milhares de áreas contaminadas através do descarte e disposição ambientalmente inadequada dos resíduos urbanos e industriais, locais com vazamentos de armazenamento subterrâneo, acidentes no setor petrolífero e, em especial, de solos contaminados por compostos orgânicos em conjunto à metais potencialmente tóxicos oriundos de atividades agrícolas e de mineração, visa-se restaurar a funcionalidade dos ecossistemas impactados ou degradados, minimizando ou evitando a

dispersão dos contaminantes para outros nichos ecológicos e para a população humana.

A legislação ambiental vigente, exige que áreas degradadas por atividades antrópicas, sejam recuperadas, neste sentido, estudos referentes a tecnologias não convencionais de remediação, como a fitorremediação, podem oferecer novas opções para prevenção, controle e remediação da poluição, mas, principalmente, podem ser empregadas para interligar processos e empresas, promovendo melhorias da condição de vida humana, com o objetivo de restaurar, desintoxicar e recuperar áreas poluídas, por exemplo, utilizando plantas verdes, uma forma energeticamente eficiente, acessível e estética de aplicar as ciências vegetais e ambientais.

As plantas selecionadas devem ter alta capacidade de absorção de poluentes orgânicos/inorgânicos e ser espécies de crescimento rápido (ROONGTANAKIAT *et al.* 2007), pois sugere-se que as plantas com maior rendimento de biomassa possuem maior contribuição para lucrar, gerando um resíduo que pode ser utilizado para elaboração de subprodutos aproveitáveis a partir da assimilação do contaminante para seu desenvolvimento: a biomassa contaminada. Dessa forma, para conclusão do ciclo sustentável deste modelo de tratamento, é necessário que exista um controle adequado do descarte para as plantas contendo poluentes ou metabólitos danosos à biota, devendo ser colhidas/coletadas e descartadas em uma maneira aprovada, eliminando corretamente os resíduos, como em um aterro de resíduos perigosos (FRAZAR, 2000) ou utilizando-os na biomineração ou para geração de energia (MOSHINA, 2005), a partir da produção de etanol de segunda geração, por exemplo, enquanto o bagaço gerado na fermentação teria como destino a confecção de plásticos biodegradáveis (MISHIMA *et al.*, 2008).

Além dos contaminantes orgânicos tradicionais, a biorremediação de contaminantes emergentes como produtos farmacêuticos e de cuidados pessoais/de saúde (PPCPs) (analgésicos, antibióticos, medicamentos antiepilépticos, agentes/desinfetantes e repelentes de insetos), tem despertado crescente preocupação da população, afirmam Kurade (2021) e Chen-Jing Liu *et al.* (2023), verificando a possibilidade de fitorremediar reservatórios de água contaminados com devidas substâncias, as quais incluem cetoprofeno, cafeína e hormônios esteróides como estrona, estradiol e estrogênio, que geram consideráveis impactos ecotoxicológicos e nocivos sobre a saúde do ser humano e dos ecossistemas.

Para o tratamento de esgoto doméstico e outros tipos de águas residuárias, como remoção dos coliformes totais e fecais, a “wetlands” naturais ou artificiais, provam ser opções viáveis e sustentáveis, comparativamente com outros tipos de tratamento, em virtude dos sistemas apresentarem fácil operação e serem rentáveis no ponto de vista técnico e econômico. De qualquer maneira, essa tecnologia apresenta limitações, pois não são simples ecossistemas,

exigem uma gestão específica que corresponda a cada tipo de poluente (HORNE, 1999).

A fitorremediação como um meio sustentável de remediação da poluição em países economicamente emergentes é consistente (SHMAEFSKY, 2020), podendo ser a proposta biotecnológica mais barata para níveis moderados de contaminantes (que permitem o desenvolvimento e crescimento da planta), em áreas que poderão ser de grandes dimensões (PELICA, 2017). Trazendo equipes multidisciplinares compostas por biólogos, químicos, engenheiros, bem como como advogados, contadores e defensores públicos (CUNNINGHAM, 1997), será possível dar prosseguimento, soluções adicionais e possibilidades para aplicação contínua de fitorremediação. Pois a nível empresarial o conhecimento ainda é limitado, não havendo ligação entre a investigação, empresas e setor político (PELICA, 2017).

As propriedades químicas e físicas do solo e do elemento alvo, devem ser avaliadas antes da seleção ou instalação da planta, determinando o resultado do projeto e os riscos financeiros, através de ferramenta quantitativa de análise de risco (LANDMEYER, 2011; JIANG, 2015) do sítio contaminado que deve ser feita, com a identificação e a quantificação dos perigos e/ou contaminantes à saúde pública, uma vez que a segurança da população deve ser priorizada dentre os bens a proteger (TELHADO *et al.*, 2010). Os estudos econômicos sobre a gestão da resistência salientam a forma de como a resistência altera (ou deveria alterar) as decisões de gestão agrícola, concentrando-se nas respostas voluntárias dos agricultores aos incentivos econômicos privados (MEGHARAJ, 2011), portanto o monitoramento e os testes de eficácia da tecnologia e análise de risco são essenciais para propósitos de eficiência e economia.

Considerando o impulso da economia associado ao desenvolvimento sustentável, o uso da biomassa para biorremediação poderia ser uma opção para impulsionar a bioeconomia em todo o mundo, apresentando extensa aplicação tecnológica, industrial e comercial de produtos e processos estabelecidos, como a produção de energia segura, melhorias na saúde pública, produção industrial sustentável, expansão do desenvolvimento social, produção de alimentos seguros, redução do impacto sobre o meio ambiente, e promoção da preservação, mitigando os efeitos das mudanças climáticas (THE EUROPEAN PLANT SCIENCE ORGANIZATION, 2011; LABUTO & CARRILHO, 2016).

A maioria dos estudos publicados sobre fitorremediação são geograficamente oriundos de regiões de clima temperado, o que traz limitações climáticas, diferente do que ocorre no Brasil, que possui clima tropical na maior parte de seu território (WASE AND FORSTER, 1997) e mesmo com o país possuindo condições favoráveis ao desenvolvimento desses processos e instrumentos, a fitorremediação é uma tecnologia ainda pouco utilizada no Brasil (MELO, 2006) e no mundo (LEONEL, 2018). As barreiras e os preconceitos acerca da falta de instrumentos de

aferição, das leis e regulamentos, dificulta a recomendação por parte das agências reguladoras e empresas ambientais (MELO, 2006; MARQUES *et al.*, 2011), como também favorecem as técnicas tradicionais em relação às inovações.

Pesquisas envolvendo fitorremediação representam oportunidades de desenvolvimento de tecnologia nacional mediante estudos voltados para os diversos problemas ambientais brasileiros (LAMENGO, 2007). Portanto, com maior apoio governamental e regulamentações eficazes, muitas pesquisas laboratoriais, sugerindo a criação de estudos piloto, protocolos experimentais e instrumentos de apoio à decisão que estimulem a aplicação da fitorremediação nos casos em que ela se apresente como a opção mais adequada, validando ainda mais essas estratégias (MARQUES *et al.*, 2011; KANG, 2014).

## 6. POTENCIALIDADES E DESAFIOS FUTUROS

A fitorremediação é uma tecnologia potencial, através do uso de plantas e seus associados para a limpeza de áreas poluídas de acordo com o tipo do poluente, é considerada uma tecnologia emergente, envolvendo diversas estratégias da remediação ambiental combinadas para o aumento da resiliência contra eventos de poluição potencialmente prejudiciais, e é provável que mais aplicações em grandes escalas sejam bem-sucedidas com a finalidade de êxito em um futuro próximo (MARTIN, 2004), que proporcionará, conseqüentemente, melhorias para sustentabilidade econômica.

O Brasil possui grande potencial para utilizar tanto a biorremediação, como a fitorremediação no tratamento de áreas contaminadas, por ocupar uma posição de destaque na área de pesquisas agronômicas e pela vantagem estratégica individual ou suplementar para remediação ambiental (FARRAJI *et al.* 2016) por apresentar elevada biodiversidade e climas favoráveis aos processos biológicos (HEEMANN *et al.*, 2018; PEREIRA, 2022). Embora o número de publicações sobre a fitorremediação no Brasil venha aumentando constantemente, é fundamental estimular o desenvolvimento de novos estudos que varrem minuciosamente a rica flora brasileira em busca de espécies adicionais aptas (BERNARDINO, 2016), pois representa uma área de pesquisa em alta com elevadas oportunidades para o desenvolvimento de tecnologia nacional como substituta sustentável para métodos tradicionais de restauração de locais contaminados (ASANTE-BADU, 2020), mediante estudos voltados para os diversos problemas ambientais brasileiros.

Além de encontrar plantas que podem funcionar como fitorremediadores a partir de diversos sistemas, Labuto & Carrilho (2016) mencionam, que estas também podem ser

geneticamente modificadas para atender a fins específicos. A engenharia genética de plantas, pode fornecer um método eficiente para aumentar a capacidade de fitorremediação das plantas a partir de genes específicos no genoma das plantas (JAMES E STRAND 2009).

Uso de Plantas Transgênicas na fitorremediação, é uma alternativa interessante para a descontaminação dos compostos tóxicos através do uso da tecnologia de DNA recombinante para gerar plantas transgênicas (MCGUINNESS & DOWLING, 2009). Futughe (2020), sugere que plantas nativas podem ser ainda mais potencializadas e melhoradas usando técnicas moleculares para otimizar o tempo de colheita, reduzir a duração do crescimento e aumentar a produção de biomassa e a profundidade das raízes. A fitotecnologia pode ser utilizada através da alelopatia, é um sistema de fitorremediação ex planta que tem sua ação a partir da engenharia de enzimas secretoras de plantas para transformar ou degradar contaminantes orgânicos em solo (WANG, 2007), e com as recentes inovações tecnológicas, existe um enorme potencial para aumentar a faixa do campo de remoção de contaminantes e sua eficiência (KANG, 2014).

Por fim, baseando-se no conhecimento prévio sobre a genética, fisiologia e bioquímicas das plantas, espera-se avançar significativamente sobre a nossa compreensão dos mecanismos relevantes para a degradação de poluentes utilizando diversas e determinadas modificações genéticas para otimização da fitorremediação.

A remediação de áreas contaminadas é um compromisso social e uma exigência legal que carece de novas regulamentações governamentais (MEGHARAJ, 2011). Diante disso, emerge um desafio fundamental de sensibilizar as autoridades competentes com o intuito que pleiteiem os órgãos governamentais de fomento à Ciência e Tecnologia, para que sejam criadas linhas de pesquisas, visando expandir a base do conhecimento sobre o diagnóstico dos poluentes que podem ser retirados ou imobilizados no solo, assim como análises de diferentes espécies nativas com potencial fitorremediador e de como traduzir com eficiência os testes de laboratório e experimentos em escala laboratorial para aplicação de campo, objetivando otimizar as eficiências ecológicas e econômicas da biorremediação, com a finalidade de criar demandas tecnológicas, oportunidades de pesquisa científica e possibilidades de negócios (ROMEIRO, 2007). Outro desafio importante é que a legislação atual e a prática na remediação do solo baseiam-se nas concentrações totais dos contaminantes deixados no solo e não na funcionalidade do solo ou gestão da terra baseada no risco (ANDERSSON-SKÖLD et al., 2009).

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A fitorremediação é uma técnica adaptável, eco-amigável e eficaz de tratamento como alternativa as remediações convencionais ou parte de uma tecnologia integrada, que está sendo cada vez mais utilizada e socialmente apetejada na gestão de áreas contaminadas e na remediação ambiental, por ser uma opção viável que ganhará as atuais crises a partir de uma remoção mais econômica, assegurando o menor impacto ao meio ambiente.

A revisão de literatura mostra que mesmo indicando uma escassez sobre esse assunto no Brasil, especialmente da aplicabilidade, houve um grande progresso nas pesquisas científicas, determinação e aferição de áreas contaminadas e dos mecanismos na utilização da tecnologia verde, operacionalmente simples, para a restauração e recuperação, designando a preferência de espécies nativas capazes de remediar diversas classes de contaminantes que podem aumentar eficientemente a aplicação da tecnologia em todo o globo terrestre, em vista das exóticas, as quais podem se tornar invasoras e comprometerem a função do ecossistema.

É de suma importância pontuar que é essencial para a fitorremediação de áreas contaminadas, que haja uma integração entre diversas áreas de atuação, pois dependem profundamente dos notórios saberes bioquímicos, vegetais, microbianos, pedológicos, entre outros artifícios empresariais e da engenharia ambiental, representando uma opção cada vez mais atrativa por demandarem gastos e quantidades energéticas relativamente baixas quando comparadas com as atuais alternativas físicas e químicas.

APÊNDICE I – Espécies Fitorremediadoras utilizadas no estado do Rio de Janeiro

https://drive.google.com/drive/u/0/folders/1Z9yq9QTpMImpUY\_X2ni2i6CSBs3tGsX

Table with columns: BOMA, FAMÍLIA, ESPÉCIE, ESTADOS, UNIDADE VEGETACIONAL, FORMA DE VIDA, ORGEM, STATUS DE DISTRIBUIÇÃO, CARACTERÍSTICAS, UTILIZAÇÃO, SÍNDROMES DANOIS - CIDADÃOS NO MAN, PORTE DA PLANTA, CRESCIMENTO: SOLO E AMBIENTACIONAL, REE BIBLIOGRÁFICAS. It lists various plant species and their characteristics for phytoremediation.

# APÊNDICE I – Espécies Fitorremediadoras utilizadas no estado do Rio de Janeiro

[https://drive.google.com/drive/u/0/folders/1Z9yq9Q7TpmImpUY\\_X2ni2i6CSBs3tsGx](https://drive.google.com/drive/u/0/folders/1Z9yq9Q7TpmImpUY_X2ni2i6CSBs3tsGx)

Estado, Mata Atlântica, Pampa	Fabaceae	Crotalaria juncata	AM, PA, BA, CE, RR, PE, MS, MT, MG, RJ, SP, PR, RS, SC, RJ, SC	Área Ametópea, Campo Receptor, Mata de Canela, Borda da mata de garrutal.	Nativa	Não Endêmica	Formorendia de solos contaminados por Herbicida Dieldrin (SOUZA, 2017) e Herbicida Sulfentrazone (GARDINHO, 2012)	Aproxiótico	<p>Spa-ely, proeminente, é forte e de fácil cultivo em vasos de 10 litros, sendo que o volume de biomassa produzida é diretamente proporcional à quantidade do herbicida no sistema solo-planta, porém não foi verificado aumento no crescimento da planta após aplicação (VASKONCELLOS, 2010)</p> <p>Passagens e como adubo verde; utilizada para produção de fitos (feno)</p> <p>Constaram mix de acúmulo desses elementos nas raízes (TSUKAMOTO, 2006; Chandra et al., 2010) e que foram utilizadas para a produção de biofertilizantes orgânicos nos ecossistemas das raízes, sendo que possivelmente os referidos metais se ligam a estes ácidos minerais ou anabólicos. Recuperação de metais de passagens conservação da diversidade biológica e cultural. Aplicação de gesso e produtos orgânicos glúten na fitorremediação de solos contaminados por metais pesados (GARDINHO, 2014)</p>	Herbicida fito	Planta herbácea	Solo fértil. Sob arvoredo, sob mata de garrutal, em áreas de solo fértil, pouco degradado	<p><a href="https://speciellab.net/">https://speciellab.net/</a></p> <p><a href="https://reforma.br.gov.br/">https://reforma.br.gov.br/</a> &amp;</p> <p><a href="https://reforma.br.gov.br/">https://reforma.br.gov.br/</a></p> <p>Liagem das Etilas e espécies nativas encontradas na região norte de plantio de Eucalyptus do Ecoparque Floresta Brasil (2009) (REHDER, J.B.R.) (SOUZA, 2017); (MADALGA, 2012); (VASKONCELLOS, 2010)</p>
Amazônia, Mata Atlântica	Fabaceae	na angustata (sin. Vigna sativa)	RN, MA, MT, MG, RJ, SP, PR	Área Ametópea	Cultivada	Não Endêmica	<p>Hires (1983) verifica o uso de V. angustata para fitorremediação de solos contaminados com Me, e Testamato (2006) para Cd e Cr</p> <p>Stess (2014) afirma Vigna angustata ser uma planta herbácea, com flores amarelas, cultivada na produção de forragem e milho, conhecida em áreas de pastagem (mandioca, mandioca, cana-de-açúcar) ou maciçada e processada (café, seringueira, feijão)</p>	Meios: Agrofito, Sili		Herbácea	Trepadeira	Solo bem drenado	<p><a href="https://speciellab.net/">https://speciellab.net/</a></p> <p><a href="https://reforma.br.gov.br/">https://reforma.br.gov.br/</a> &amp;</p> <p><a href="https://reforma.br.gov.br/">https://reforma.br.gov.br/</a></p> <p>(HORSI, 1983); (TSUKAMOTO et al., 2006); (REHDER, J.B.R., 2009); (SOUSA et al., 2014); (GARDINHO et al., 2014)</p>
Cerrado, Mata Atlântica	Fabaceae	Mucuna perennis	PA, GO, MS, BA, MG, RJ, SP	Área Ametópea	Cultivada	Invasora Exótica	<p>Pere (2003) verifica o potencial de Mucuna perennis com potencial para uso na fitorremediação de Telômeros e Vasconcelos (2012) para o grupo de herbicidas linazapir.</p>	Aproxiótico		Herbácea	Trepadeira	Solo arenoso	<p><a href="https://speciellab.net/">https://speciellab.net/</a></p> <p><a href="https://reforma.br.gov.br/">https://reforma.br.gov.br/</a> &amp;</p> <p><a href="https://reforma.br.gov.br/">https://reforma.br.gov.br/</a></p> <p>(PRESS et al., 2003); (VASKONCELLOS et al., 2011)</p>
Mata Atlântica	Fabaceae	Mucuna aberrans (sin. Strachanum aberrans)	BA, GO, MG, RJ	Área Ametópea, Floresta Estacional Semidecidual	Nativa	Não Endêmica	<p>Santos &amp; Pires (2014), (2014) verificam eficiência na fitorremediação de Trifluralina em Solos e rano o Testamato (PHEES, 2003) e linazapir. (VASKONCELLOS, 2010)</p> <p>Resumo em português do grupo Metodologias de Avaliação da Fitorremediação de Solos e Áreas Contaminadas por Metais Pesados e Herbicidas. Souza (2010) indica possibilidade de fitorremediação de Pb em associação com Gloms-entrucum, um Fungo micorrízico arbuscular</p>	Meios		Liana ou trepadeira herbácea	Liana ou trepadeira herbácea		<p><a href="https://speciellab.net/">https://speciellab.net/</a></p> <p><a href="https://reforma.br.gov.br/">https://reforma.br.gov.br/</a> &amp;</p> <p><a href="https://reforma.br.gov.br/">https://reforma.br.gov.br/</a></p> <p>(SANTOS et al., 2014); (PHEES et al., 2005); (SOUZA, 2010); (VASKONCELLOS et al., 2012); (PRAKASHTO et al., 2005)</p>
Mata Atlântica, Pampa	Fabaceae	Lathyrus sativus	MG, RJ, SP, PR, RS, SC	Campo Limpo, Vegetação Sobre Aldo Lativoleiopardata, Mataduro	Cultivada	Não Endêmica	<p>Demonstra boas herbicidas em Pb</p>	Meios		Erva	Erva	Solo fértil a colheita de grão	<p><a href="https://speciellab.net/">https://speciellab.net/</a></p> <p><a href="https://reforma.br.gov.br/">https://reforma.br.gov.br/</a> &amp;</p> <p><a href="https://reforma.br.gov.br/">https://reforma.br.gov.br/</a></p> <p>(SOUZA, 2010)</p>
Mata Atlântica, Pampa	Fabaceae	Trifolium repens (sin. officinalis) (sin. Medicago)	RJ, SP, PR, RS, SC	Área Ametópea	Cultivada	Introduzida	<p>Mirret et al. (2019) verifica a potencialidade da Medicago alba com linhagens de degradação de herbicidas implantadas para atividades de degradação de hidrocarbônios. Efeitos para estudos de fitorremediação de HPW em solos contaminados</p>	Hidrocarbônios		Herbácea	Herbácea		<p><a href="https://speciellab.net/">https://speciellab.net/</a></p> <p><a href="https://reforma.br.gov.br/">https://reforma.br.gov.br/</a> &amp;</p> <p><a href="https://reforma.br.gov.br/">https://reforma.br.gov.br/</a></p> <p>(MIRRET, 2019)</p>
Mata Atlântica, Pampa	Fabaceae	Vicia sativa	MG, RJ, SP, PR, RS, SC	Área Ametópea, Campo de Alimad, Campo Limpo, Campo Receptor	Nativa	Exótica / Introduzida	<p>Alto biodegradação para os herbicidas imidazolinonas (GARDINHO et al., 2014; SOUZO, 2020)</p>	Aproxiótico		Herbácea	Herbácea		<p><a href="https://speciellab.net/">https://speciellab.net/</a></p> <p><a href="https://reforma.br.gov.br/">https://reforma.br.gov.br/</a> &amp;</p> <p><a href="https://reforma.br.gov.br/">https://reforma.br.gov.br/</a></p> <p>(GARDINHO et al., 2014); (SANTOS et al., 2010)</p>
Mata Atlântica, Pampa	Fabaceae	Vicia villosa	MG, RJ, SP, PR, RS, SC	Vegetação Excepo campo garrutal, Sobre arbustos na Floresta Ombrifila Mista	Cultivada	Não Endêmica	<p>O grupo de erradicada pela Vicia villosa acumula Cu na parte aérea (VENDRUSKOLLO, 2013)</p>	Meios		Herbácea	Herbácea	Solo fértil	<p><a href="https://speciellab.net/">https://speciellab.net/</a></p> <p><a href="https://reforma.br.gov.br/">https://reforma.br.gov.br/</a> &amp;</p> <p><a href="https://reforma.br.gov.br/">https://reforma.br.gov.br/</a></p> <p>(VENDRUSKOLLO, 2013)</p>



## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, Agência Brasileira de Normas Técnicas – Norma **NBR 6502** – Tamanho de partículas de solos, Rio de Janeiro, 1995.
- AGUIAR P. H. da S., LIMA R. A., Fabaceae: Importância Ecológica do Feijão Guandu (*Canajus cajan* L.); **Revista EDUCAmazônia - Educação Sociedade e Meio Ambiente**; v. 16, n. 1, jan-jun, pág. 172-180, 2023.
- ALI, H., KHAN, E., & SAJAD, M. A., Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. **Chemosphere**, v. 91; n. 7, 869–881; 2013.
- ALKORTA, I., & GARBISU, C., Phytoremediation of organic contaminants in soils. **Bioresource Technology**, v. 79; n. 3, 273–276; 2001.
- ANA – Agencia Nacional de Águas. Cobrança do uso da água. mar. 2004.
- ANDERSSON-SKÖLD Y., ENELL A., BLOM S., RIHM T., ANGELBRATT A., HAGLUND K., WIK O., BARDOS P., TRACK T., AND KEUNING S., Biofuel and other biomass based products from contaminated sites – potentials and barriers from Swedish perspectives, Swedish Geotechnical Institute, Linköping, 2009.
- ARÉVALO A. T. V., Biorremediação na Gestão de Áreas Contaminadas: Princípio, Aplicações e Perspectivas; Universidade de São Paulo; 2020.
- ARTHUR, E. L., RICE, P. J., RICE, P. J., ANDERSON, T. A., BALADI, S. M., HENDERSON, K. L. D., & COATS, J. R., Phytoremediation—An Overview. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 24; n. 2, 109–122; 2005.
- ASANTE-BADU et al.: Phytoremediation of organic and inorganic compounds in a natural and an agricultural environment: a review; 2020.
- ASSIS R. L. DE, PROCÓPIO S. DE O., CARMO M. L. DO, PIRES F. R., CARGNELUTTI FILHO A., BRAZ G. B. P., & SILVA W. F. P., Fitorremediação de solo contaminado com o herbicida picloram por plantas de *Panicum maximum* em função do teor de água. **Engenharia Agrícola**, v. 30; n. 5, 845–853; 2010.
- AYDOGAN, A., & MONTOYA, L. D., Formaldehyde removal by common indoor plant species and various growing media. **Atmospheric Environment**, v. 45; n. 16, 2675–2682; 2011.
- BAKER A. J. M.; MCGRATH S. P.; REEVES R. D.; SMITH J. A. Metal hyperaccumulator in plants: A review of ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal-polluted soils. In: **Phytoremediation of Contaminated Soil and Water**. Ed. N. Terry and G. Bañuelos. Lewis Publishers, Boca Raton; p. 129-158; 2000.
- BARTUCCA, M.L.; CERRI, M.; FORNI, C. Phytoremediation of Pollutants: Applicability and Future Perspective; v. 12, 2462, **Plants**; 2023.
- BATTY, L. C., & DOLAN, C., The Potential Use of Phytoremediation for Sites With Mixed Organic and Inorganic Contamination. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 43; n. 3, 217–259; 2013.
- BELTRANE, L. F. ; OLIVEIRA, L. F. de .; LIMEIRA, D. M. . Environmental Biotechnology in northern Paraná: A systematic review of recent literature. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 12, n. 11, 2023.
- BENEMANN, J.R., RABSON R., TAVARES J., & LEVINE R., (and workshop participants); Summary Report of a Workshop on Phytoremediation Research Needs; 1994.
- BERNARDINO, C. A. R., MAHLER, C. F., PREUSSLER, K. H., & NOVO, L. A. B. State of the Art of Phytoremediation in Brazil—Review and Perspectives. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 227; n. 8; 2016.
- BLAYLOCK M. J., Field Demonstrations of Phytoremediation of Lead-Contaminated Soils; **Phytoremediation of contaminated soil and water**; editors Norman; Bañuelos; 1999.

- BOONSANER, M ; BORRIRUKWISITSAK, S ; BOONSANER, A. Phytoremediation of BTEX contaminated soil by *Canna × generalis*. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.74; n. 6, p.1700-1707, 2011.
- BORTOLOTTI G. A., Estratégias de tolerância da fitorremediação de metais pesados em plantas-modelo: um estudo de caso em espécies do gênero botânico Brassica; 2021.
- BRASIL. **Decreto Federal nº 23.793**, de 10 de julho de 1934. Decreta o Código das Águas. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 23 jan. 1934a.
- BRASIL. **Decreto nº 24.643**, de 10 de julho de 1934. Institui o Código das Águas, Estabelecendo Definições e Regras Gerais Sobre o Uso da Água no Território Nacional. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 10 jul. 1934b.
- BRASIL. **Instrução Normativa ICMBIO Nº 11**, de 11 de dezembro de 2014. Disponível em: [https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Instrucao\\_normativa/2014/in\\_icmbio\\_11\\_2014\\_estabelece\\_procedimentos\\_prad.pdf](https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Instrucao_normativa/2014/in_icmbio_11_2014_estabelece_procedimentos_prad.pdf) . Acesso em: 03 dezembro. 2023. Brasília, DF, 2014
- BRASIL. **Lei nº 6.225**, de 14 de julho de 1975. Dispõe sobre discriminação, pelo Ministério da Agricultura, de regiões para execução obrigatória de planos de proteção ao solo e de combate à erosão e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 14 jul. 1975. Disponível em: < <http://www.lei.adv.br/6225-75.htm>>. Acesso em: 15 nov. 2023.
- BRASIL. **Lei nº 8.171**, de 17 de janeiro de 1991. Dispõe sobre a política agrícola. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 17 jan. 1991. Disponível em: < [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Leis/L8171.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L8171.htm)>. Acesso em: 25 mar. 2023.
- BRASIL. **Lei nº 9.433**, de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 08 jan. 1997.
- BRASIL. **Lei nº 9.984**, de 17 de julho de 2000. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas – ANA, entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 17 jul. 2000. Disponível em: Acesso em: 25 nov. 2023.
- BRAUN, A. B., TRENTIN, A. W. da S., VISENTIN, C., & THOMÉ, A., Sustainable remediation through the risk management perspective and stakeholder involvement: A systematic and bibliometric view of the literature. **Environmental Pollution**, v. 255; 2019.
- BROOKS, R.R., LEE, J., REEVES, R.D. AND JAFFR, T., Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants. **J. Geochem. Explor.**, v. 7 : 49—57; 1977.
- BRUNETTI, G., FARRAG, K., ROVIRA, P. S., NIGRO, F., & SENESI, N., Greenhouse and field studies on Cr, Cu, Pb and Zn phytoextraction by *Brassica napus* from contaminated soils in the Apulia region, Southern Italy. **Geoderma**, v. 160; n. 3-4, 517–523; 2011.
- BUCHANAN, I., LIANG, H. C., KHAN, W., LIU, Z., SINGH, R., IKEHATA, K., & CHELME-AYALA, P., Pesticides and Herbicides. **Water Environment Research**, v. 81; n. 10, 1731–1816; 2009.
- BURGES, A., EPELDE, L., BENITO, G., ARTETXE, U., BECERRIL, J. M., & GARBISU, C., Enhancement of ecosystem services during endophyte-assisted aided phytostabilization of metal contaminated mine soil. **Science of The Total Environment**, v. 562, 480–492; 2016.
- BUTCHER, D. J., Phytoremediation of Lead in Soil: Recent Applications and Future Prospects. **Applied Spectroscopy Reviews**, v. 44; n. 2, 123–139; 2009.
- CABELLO-CONEJO, M. I., BECERRA-CASTRO, C., PRIETO-FERNÁNDEZ, A., MONTERROSO, C., SAAVEDRA-FERRO, A., MENCH, M., & KIDD, P. S., Rhizobacterial inoculants can improve nickel phytoextraction by the hyperaccumulator *Alyssum pintodasilvae*. **Plant and Soil**, v. 379; n. 1-2, p. 35–50; 2014.

- CALDERÓN G. A. M., Evaluación de la capacidad fitorremediadora de *Megathyrus maximus* en suelos de sabanas contaminados con hidrocarburos de petróleo pesado; 2014.
- CALIJURI, M. L.; BASTOS, R. K. X.; MAGALHÃES, T. B.; CAPELETE, B. C.; DIAS, E. H. O. Tratamento de esgotos sanitários em sistemas reatores UASB/wetlands construídas de fluxo horizontal: eficiência e estabilidade de remoção de matéria orgânica, sólidos, nutrientes e coliformes. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**. v.14, n.3, p. 421-430, jul/set 2009
- CANTONI F., SILVA A. de S., LOPES M. A., LAVNITCKI L., Fitorremediação e Biochar: Uma Alternativas para Recuperação de Áreas Pós Mineração; **Terra: Habitats Urbanos e Rurais**; Ituiutaba – MG; Brasil; 2019.
- CARVALHO, L. F. C., Espécies vegetais para fitorremediação de contaminantes orgânicos: uma revisão de literatura. ; Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023.
- CASTELO-GRANDE, T., AUGUSTO, P. A., MONTEIRO, P., ESTEVEZ, A. M., & BARBOSA, D., Remediation of soils contaminated with pesticides: a review. **International Journal of Environmental Analytical Chemistry**, v. 90; n. 3-6, 438–467; 2010.
- CETESB. Conceituação – áreas contaminadas. 2001.
- CHANDRA R. P.; ABDUSSALAM A.K.; SALIM N. et al. Distribution of bio-accumulated Cd and Cr in two *Vigna* species and the associated histological variations; **Journal of Stress Physiology & Biochemistry**, India, v. 6; n. 1, p. 4-12; 2010.
- CHANDRA R., DUBEY N. K., KUMAR V., Phytoremediation of Environmental Pollutants; 2018
- CHANDRA, R., KUMAR, V., Phytoextraction of heavy metals by potential native plants and their microscopic observation of root growing on stabilised distillery sludge as a prospective tool for in situ phytoremediation of industrial waste. **Environmental Science and Pollution Research**; v. 24; n. 3; p. 2605–2619; 2017.
- CHAPMAN, P. M., Determining when contamination is pollution — Weight of evidence determinations for sediments and effluents. **Environment International**, v. 33; n. 4, 492–501; 2007.
- CHEN-JING LIU, SONG-GE DENG, CHUN-YAN HU, PENG GAO, EAKALAK KHAN, CHANG-PING YU & LENA Q. MA; Applications of bioremediation and phytoremediation in contaminated soils and waters: CREST publications during 2018–2022, **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 53; n. 6, p. 723-732; 2023
- CHUNG-SHIH T., Sectored Planters for Phytoremediation Studies; Phytoremediation, Methods In Biotechnology; Chapter 15; v. 23: **Phytoremediation: Methods and Reviews**; 2007.
- COLLA, L. M.; PRIMAZ, A. L.; LIMA, M.; BERTOLIN, T. E.; COSTA, J. A. V. Isolamento e seleção de fungos para biorremediação a partir de solo contaminado com herbicidas triazínicos. **Ciência e Agrotecnologia, Lavras**, v. 32, n. 3, p. 809-813, maio-junho., 2008.
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 420 de 28 de dezembro de 2009: critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas, ed. Diário Oficial da União nº 249, 2009.
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 430/2011 e Deliberação Conjunta do COPAM-CERH Nº 01/2008.
- CONAMA., Resolução CONAMA No 463, de 29 de julho de 2014.
- COOK, R. L., & HESTERBERG, D., Comparison of Trees and Grasses for Rhizoremediation of Petroleum Hydrocarbons. **International Journal of Phytoremediation**, v. 15; n. 9, 844–860; 2013.
- COSTA, A. B., & ZOLTOWSKI, A. P. C., Como escrever um artigo de revisão sistemática. In: Koller, S., Couto, P. & Von Hohendorff, J. (Orgs.), **Manual de Produção Científica**. Porto Alegre: Penso, 191 p; 2014.

- COUTINHO, H. D.; BARBOSA, A. R. Fitorremediação: Considerações Gerais e Características de Utilização., **Silva Lusitana**, v. 15; n. 1. p. 103-117, 2007.
- CUI, Q., ZHANG, Z., BEIYUAN, J., CUI, Y., CHEN, L., CHEN, H., & FANG, L., A critical review of uranium in the soil-plant system: Distribution, bioavailability, toxicity, and bioremediation strategies. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 53; n. 3, 340–365; 2022.
- CUNNINGHAM, S. D., & BERTI, W. R., Remediation of contaminated soils with green plants: An overview. **In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant**, v. 29; n. 4, 207–212; 1993.
- CUNNINGHAM, S. D., BERTI, W. R., & HUANG, J. W., Phytoremediation of contaminated soils. **Trends in Biotechnology**, v. 13; n. 9, p. 393–397; 1995.
- CUNNINGHAM, S. D., ANDERSON, T. A., PAUL SCHWAB, A., & HSU, F. C., Phytoremediation of Soils Contaminated with Organic Pollutants. **Advances in Agronomy**, p. 55–114; 1996.
- CUNNINGHAM S. D., Phytoremediation of Contaminated Water and Soil; **ACS Symposium Series**; 1997.
- DASAPPA, S. M., & LOEHR, R. C., Toxicity reduction in contaminated soil bioremediation processes. **Water Research**, v. 25; n. 9, 1121–1130; 1991.
- de MELLO-FARIAS PC, CHAVES AL, LECINA CL; Transgenic plants for enhanced phytoremediation—physiological studies. In: Alvarez M (ed) **Genetic transformation**. IntechOpen, London, UK; 2011.
- DOBSON, A. P., Hopes for the Future: Restoration Ecology and Conservation Biology. **Science**, v. 277; n. 5325, 515–522; 1997.
- DUKE, S. O., Overview of herbicide mechanisms of action. **Environmental Health Perspectives**, v. 87, 263–271; 1990.
- EDWARDS, C. A., & PIMENTEL, D., Impact of herbicides on soil ecosystems. **CRITICAL REVIEWS IN PLANT SCIENCES**, v. 8; n. 3, p. 221–257; 1989.
- EEVERS, N., WHITE, J. C., VANGRONSVELD, J., & WEYENS, N., Bio- and Phytoremediation of Pesticide-Contaminated Environments. **Advances in Botanical Research**, p. 277–318; 2017.
- ELEKES, C.C., Eco-technological solutions for the remediation of polluted soil and heavy metal recovery. In: Hernández-Soriano, M.C. (Ed.), **Environmental Risk Assessment of Soil Contamination**. InTech, Rijeka, p. 309–335; 2014.
- ERAKHRUMEN; AGBONTALOR A., Phytoremediation: an environmentally sound technology for pollution prevention, control and remediation in developing countries; **Educational Research and Review**; v. 2; n. 7, p. 151-156, July 2007.
- FAKAYODE S. O.; ONIANWA P. C. Heavy metal contamination of soil, and bioaccumulation in, guinea grass (*Panicum maximum*) around Ikeja Industrial Estate Lagos, Nigéria. **Environmental Geology**, v. 43, p. 145-150, 2002.
- FAO, ITPS., Status Of The World's Soil Resources: Main Report (Italy Rome); 2015.
- FARRAJI H., ROBINSON B., MOHAJERIP., ABEDIT., Phytoremediation: green technology for improving aquatic and terrestrial environments; **Nippon Journal of Environmental Science**; 2020.
- FARRAJI H, ZAMAN NQ, TAJUDDIN RM, FARAJI H Advantages and disadvantages of phytoremediation: a concise review. **Int J Environ Technol Sci**; v. 2:69–75; 2016.
- FARNEZI M. M. M., Produção de fitólitos por gramíneas em solos contaminados por metais pesados; Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina-MG, 2019.
- FAXINA, R. R. de C. Espécie de vereda na fitorremediação de efluente de uma central de processamento de alimentos vegetais; Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

- FENG, N.-X., YU, J., ZHAO, H.-M., CHENG, Y.-T., MO, C.-H., CAI, Q.-Y., ... WONG, M.-H., Efficient phytoremediation of organic contaminants in soils using plant–endophyte partnerships. **Science of The Total Environment**, 583, 352–368; 2017.
- FERREIRA T. C., Caracterização e seleção de rizóbios noduladores de leguminosas florestais para recuperação de áreas contaminadas por petróleo; 2007.
- FLETCHER J., WILLBY N., OLIVER D. M., QUILLIAM R. S., Phytoremediation Using Aquatic Plants; Phytoremediation: In-Situ Applications; Springer; B. R. Shmaefsky (ed.), Phytoremediation, **Concepts and Strategies in Plant Sciences**; 2020.
- FRANCESCO L., Modelagem Numérica de Processos de Fitorremediação de Solos; Rio de Janeiro; 2011.
- FRANCO, L. O.; MAIA, R. C. C.; PORTO, A. L. F.; MESSIAS, A. S.; FUKUSHIMA, K.; TAKAKI, G. M. C. Heavy metal biosorption by chitin and chitosan isolated from *Cunninghamella elegans* (IFM 46109). **Brazilian Journal of Microbiology**. v. 35, p. 243-247, 2004.
- FRAZAR C; The Bioremediation and Phytoremediation of Pesticide-contaminated Sites; National Network of Environmental Studies (NNEMS); **Environmental Protection Agency Office of Solid Waste and Emergency Response Technology Innovation Office**; Washington, DC; 2000.
- FUTUGHE A. E., PURCHASE D., JONES H.; Phytoremediation Using Native Plants; Phytoremediation: In-Situ Applications; Springer; B. R. Shmaefsky (ed.), Phytoremediation, **Concepts and Strategies in Plant Sciences**; 2020.
- GABOS M. B., ABREU C. A., COSCIONE A. R., Lixiviação e absorção de Pb pelo feijão-de-porco assistido pela aplicação de edta no solo; **Sci. Agric.**, v. 66, n. 4, p. 506-514; 2009.
- GALON L., LIMA A.M., GUIMARÃES S., BELARMINO J.G., BURG G.M., CONCENÇO G., BASTIANI M.O., BEUTLER A.N. ZANDONA R.R., and RADÜNZ A.L.; Potential of plant species for bioremediation of soils applied with imidazolinone herbicides; *Planta Daninha*, Viçosa-MG, v. 32, n. 4, p. 719-726, 2014.
- GARBISU, C., & ALKORTA, I., Phytoextraction: a cost-effective plant-based technology for the removal of metals from the environment. **Bioresource Technology**, v. 77; n. 3, 229–236; 2001.
- GARBISU, C., ALLICA, J. H., BARRUTIA, O., ALKORTA, I., & BECERRIL, J. M., Phytoremediation: A Technology Using Green Plants to Remove Contaminants from Polluted Areas. **Reviews on Environmental Health**, v. 17; n. 3; 2002.
- GAYLARDE, C.C.; BELLINASSO, M.L.; MANFIO, G.P. Biorremediação: aspectos biológicos e técnicos da biorremediação de xenobióticos. **Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento**, n. 34, 2005.
- GERIM N. D. C. G., Análise Comparativa e Metodologias de Avaliação de Locais Contaminados; Universidade Nova de Lisboa; 2012.
- GERHARDT, K. E., GERWING, P. D., HUANG, X.-D., & GREENBERG, B. M., Microbe-Assisted Phytoremediation of Petroleum Impacted Soil. **Handbook of Oil Spill Science and Technology**, 407–427; 2015.
- GERHARDT, K. E., GERWING, P. D., & GREENBERG, B. M., Opinion: Taking phytoremediation from proven technology to accepted practice. **Plant Science**, 256, 170–185; 2017.
- GIANESSI, L. P., The increasing importance of herbicides in worldwide crop production. **Pest Management Science**, v. 69; n. 10, 1099–1105; 2013.
- GIANNETTI B. F., ALMEIDA C. B. de A., BONILLA S. H., Implementação de Eco-Tecnologias Rumo à Ecologia Industrial; **RAE-eletrônica**, v. 2, n. 1, 2003.

- GHOSH P., KONAR A., DALAL D. das., ROY A., CHATTERJEE S., Phytoremediation technology: A review; **International Journal of Agriculture and Plant Science**; v. 5; n. 1; 44-49; 2023.
- GOLDSBROUGH P., Metal tolerance in plants: the role of phytochelatins and metallothioneins; **Phytoremediation of contaminated soil and water**; editors Norman; Bañuelos; 1999.
- GOMES, H. I., Phytoremediation for bioenergy: challenges and opportunities. **Environmental Technology Reviews**, v. 1; n. 1, 59–66; 2012.
- GONZÁLEZ-OREJA, J. A., ROZAS, M., ALKORTA, I., & GARBISU, C., Dendroremediation of Heavy Metal Polluted Soils; **Reviews on Environmental Health**, v. 23; n. 3; 2008.
- HALL, J., SOOLE, K., & BENTHAM, R., Hydrocarbon Phytoremediation in the Family Fabaceae—A Review. **International Journal of Phytoremediation**, v. 13; n. 4, 317–332; 2011.
- HANSEN É., SOARES M. G., Tecnologias de Remediação de Áreas Contaminadas por Hidrocarbonetos; 2012.
- HEEMANN, T. P., ARANTES, S., ANDRADE, E., VIANA, D., & SELLA, H., Phytoremediation Capacity of Forest Species to Herbicides in Two Types of Soils. **Floresta e Ambiente**, v. 25 n. 3; 2018.
- HERNÁNDEZ VALENCIA, I., NAVAS, G., & INFANTE, C., Fitorremediación de un suelo contaminado con petróleo extra pesado con *Megathyrus maximus*; **Revista Internacional de Contaminación Ambiental**, v. 33; n. 3, 495–503; 2017.
- HOFFMANN, R. B. et al. Efeito da aplicação de diferentes produtos na solubilidade de Cd em solos tratados com lodo de esgoto enriquecido. **Revista Universidade Rural - Série Ciências da Vida. Seropédica**, Rio de Janeiro : EDUR, v. 24, n. 1. p. 37-43, 2004.
- HORNE A. J., Phytoremediation by Constructed Wetlands; **Phytoremediation of contaminated soil and water**; editors Norman; Bañuelos; 1999.
- HORST, WJ. Factors responsible for genotypic manganese tolerance in cowpea (*Vigna unguiculata*). **Plant Soil**, v. 72, 213-218, 1983.
- HUSSAIN, S., SIDDIQUE, T., ARSHAD, M., & SALEEM, M., Bioremediation and Phytoremediation of Pesticides: Recent Advances. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 39; n. 10, 843–907; 2009.
- IMRAN M. K., CHEEMA S. A., NIAZI S. A. N. K. N., AZAM M., BASHIR., S., ASHRAF I., QADRI R., Phytoremediation of Agricultural Pollutants; Phytoremediation: In-Situ Applications; Springer; B. R. Shmaefsky (ed.), **Phytoremediation, Concepts and Strategies in Plant Sciences**; 2020.
- ISO (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION). ISO 17402: Guidance for the Selection and Application of Methods for the Assessment of Bioavailability of Contaminants in Soil and Soil Materials Geneva: **ISO**, 2006.
- JAMES, C. A., & STRAND, S. E., Phytoremediation of small organic contaminants using transgenic plants. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 20; n. 2, 237–241; 2009.
- JIANG, Y., LEI, M., DUAN, L., & LONGHURST, P., Integrating phytoremediation with biomass valorisation and critical element recovery: A UK contaminated land perspective. **Biomass and Bioenergy**, v. 83, 328–339; 2015.
- JOHANSEN, C. A., Pesticides and Pollinators. *Annual Review of Entomology*, v. 22; n. 1, 177–192; 1977.
- KANG, J. W., Removing environmental organic pollutants with bioremediation and phytoremediation. **Biotechnology Letters**, v. 36; n. 6, p. 1129–1139; 2014.
- KHAN M., SHAHEEN S., ALI S., YI Z., CHENG L., KHAN M., AZAM M., RIZWAN M., AFZAL M., IRUM G., KHAN M. J., SHUIJIN Z., In Situ Phytoremediation of Metals;

- Phytoremediation: In-Situ Applications; Springer; B. R. Shmaefsky (ed.), **Phytoremediation, Concepts and Strategies in Plant Sciences**; 2020.
- KIDD, P., MENCH, M., ÁLVAREZ-LÓPEZ, V., BERT, V., DIMITRIOU, I., FRIESL-HANL, W. PUSCHENREITER, M., Agronomic Practices for Improving Gentle Remediation of Trace Element-Contaminated Soils. **International Journal of Phytoremediation**, v. 17; n. 11, p. 1005–1037; 2015.
- KURADE, M. B., HA, Y.-H., XIONG, J.-Q., GOVINDWAR, S. P., JANG, M., & JEON, B.-H., Phytoremediation as a green biotechnology tool for emerging environmental pollution: A step forward towards sustainable rehabilitation of the environment. **Chemical Engineering Journal**; 2021.
- LABUTO, G., & CARRILHO, E. N. V. M., Bioremediation in Brazil. **Bioremediation and Bioeconomy**, p. 569–588; 2016.
- LAMEGO F. P., VIDAL R. A., Fitorremediação: Plantas como agentes de despoluição; **Pesticidas: r. ecotoxicol. e meio ambiente**, Curitiba, v. 17, p. 9-18, jan./dez. 2007
- LANDMEYER J. E., Introduction to phytoremediation of contaminated groundwater: historical foundation, hydrologic control, and contaminant remediation. Springer, Berlin; 2011.
- LEDUC, D. L., & TERRY, N., Phytoremediation of toxic trace elements in soil and water. **Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology**; 2005.
- LEI N. 997, DE 31 DE MAIOR DE 1976; Dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente; 1976.
- LEI N. 6.134, DE 2 DE JUNHO DE 1988; Dispõe sobre a preservação dos depósitos naturais de águas subterrâneas do Estado de São Paulo, e dá outras providências; 1988.
- LEONEL, L. V. et al. Biorremediação do solo. **Revista Terra & Cultura: Cadernos de Ensino e Pesquisa**, [S.l.], v. 26, n. 51, p. 37-52, ago. 2018. ISSN 2596-2809. Disponível em: <<http://periodicos.unifil.br/index.php/Revistateste/article/view/257>>. Acesso em: 10 nov. 2023.
- LIM, M. W., LAU, E. V., & POH, P. E., A comprehensive guide of remediation technologies for oil contaminated soil — Present works and future directions. *Marine Pollution Bulletin*, v. 109; n. 1, 14–45; 2016.
- MA, Y., PRASAD, M. N. V., RAJKUMAR, M., & FREITAS, H., Plant growth promoting rhizobacteria and endophytes accelerate phytoremediation of metalliferous soils. **Biotechnology Advances**, v. 29; n. 2, 248–258; 2011.
- MACHADO C. J. S., VILANI R. M., FRANCO M. G., LEMOS S. D. da C., Legislação ambiental e degradação ambiental do solo pela atividade petrolífera no Brasil; **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 28, p. 41-55, 2013.
- MACNAIR M. R., TILSTONE G. H., SMITH S. E., The Genetics of Metal Tolerance and Accumulation in Higher Plants; Phytoremediation of contaminated soil and water; editors Norman; Bañuelos; 1999.
- MADALÃO J. C., PIRES F. R., CHAGAS K., FILHO A. C., PROCÓPIO S. O., Uso de leguminosas na fitorremediação de solo contaminado com sulfentrazone; **Pesq. Agropec. Trop.**, Goiânia, v. 42, n. 4, p. 390-396, 2012.
- MANZINI F. F., SÁ K. B de; PLICAS L. D. de A., MOREIRA A. B., Tecnologias de Remediação de Solos; Periódico eletrônico – **Forum Ambiental da Alta Paulista**; v. 07, n. 12; 2011.
- MATTHEWS G., Pesticides: Health, Safety and the Environment; Second Edition; Imperial College, UK; 2016
- MARQUES M., AGUIAR C. R. C., SILVA J. J. L. S. da., Desafios Técnicos e Barreiras Sociais, Econômicas e Regulatórias na Fitorremediação de Solos Contaminados; 2011.
- MARTIN, T. A., & RUBY, M. V., Review of in situ remediation technologies for lead, zinc, and cadmium in soil; **Remediation Journal**, v. 14; n. 3, p. 35–53; 2004.

- MCGUINNESS, M., & DOWLING, D., Plant-Associated Bacterial Degradation of Toxic Organic Compounds in Soil. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 6; n. 8, p. 2226–2247; 2009.
- MEAGHER, R. B. Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 3; n. 2, p. 153–162; 2000.
- MEDAURA, M. C.; ÉRCOLI, E. C. Bioconversion of petroleum hydrocarbons in soil using filter cake. **Brazilian Journal of Microbiology**. v. 39, p. 427–432, 2008.
- MEGHARAJ, M., RAMAKRISHNAN, B., VENKATESWARLU, K., SETHUNATHAN, N., & NAIDU, R., Bioremediation approaches for organic pollutants: A critical perspective. *Environment International*, v. 37; n. 8, p. 1362–1375; 2011.
- MELNIKOV N. N., FRANCES A. GUNTHER, **Chemistry of Pesticides**; Jane Davies Gunther (eds.); Springer; Verlag New York; 1971.
- MENCH M., VANGRONSVELD J., CLIJSTERS H., LEPP N. W., EDWARDS R., In Situ Metal Immobilization and Phytostabilization of Contaminated Soils; **Phytoremediation of contaminated soil and water**; editors Norman; Bañuelos; 1999.
- MENCH, M., SCHWITZGUÉBEL, J.-P., SCHROEDER, P., BERT, V., GAWRONSKI, S., & GUPTA, S., Assessment of successful experiments and limitations of phytotechnologies: contaminant uptake, detoxification and sequestration, and consequences for food safety. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 16; n. 7, p. 876–900; 2009
- MELO R. F., Potencial de Espécies Vegetais para fitorremediação de um solo contaminado por arsênio; Brasil; 2006.
- MENEGAES J. F., BACKES F. A. A. L., Plantas bioativas para uso no paisagismo; **Rev. Elet. Cient. da UERGS.**, v. 7, n. 01, p. 41-49; 2021.
- MIELKE K.C. et al., Does Canavalia ensiformis inoculation with Bradyrhizobium sp. enhance phytoremediation of sulfentrazone-contaminated soil?; **Chemosphere**; 2020.
- MISRA, S., MISRA, K.G., Phytoremediation: An Alternative Tool Towards Clean and Green Environment. In: Shah, S., Venkatramanan, V., Prasad, R. (eds); **Sustainable Green Technologies for Environmental Management**. Springer, Singapore; 2019.
- MISHIMA, D.; KUNIKI, M.; SEI, K.; SODA, S.; IKE, M.; FUJITA, M. Ethanol production from candidate energy crops: water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and water lettuce (*Pistia stratiotes* L.). **Bioresour Technol** v. 99, p. 2495–2500, 2008.
- MITTER, E. K.; KATAOKA, R.; FREITAS, J. R.; GERMIDA, J. J. Potential use of endophytic root bacteria and host plants to degrade hydrocarbons. **International journal of phytoremediation**, v. 21, n. 9, p. 928-938, 2019.
- MONDAL S., PALIT D., Prospects of Biotechnology for a Sustainable Environment; Environmental and sustainable development through forestry and other resource; 2020.
- MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J.O. Xenobióticos do solo. **Microbiologia e Bioquímica do Solo**. Cap. 6. p. 263-311, 2006.
- MORILLO, E., & VILLAVARDE, J., Advanced technologies for the remediation of pesticide-contaminated soils. **Science of The Total Environment**, 586, 576–597; 2017
- MOSHINA S. T. A., Prospects for phytoremediation of land remediation in Russia; 2005.
- NISHIMURA, A. S. Avaliação da remoção dos macronutrientes nitrogênio e fósforo de efluente de abatedouro por fitorremediação; Uberlândia; 2020.
- NOGUEIRA, S.B., BARON, D., Phytoremediation: a viable technique in sugarcane farm heavy metals contaminated. **Revista Ciência, Tecnologia & Ambiente**, v. 12, 2022.
- ODOH, C. K., ZABBEY, N., SAM, K., & EZE, C. N., Status, progress and challenges of phytoremediation - An African scenario. **Journal of Environmental Management**, 237, 365–378; 2019.
- PELICA J. P. F; Fitorremediação em solos contaminados com arsênio, por duas espécies de *Eucalyptus* (*Eucalyptus globulus* Labill e *Eucalyptus nitens* Deane & Maiden); 2017.



- PEREIRA, Alexandre Ramos. Espécies de plantas nativas brasileiras com potencial de fitorremediação de metais: uma revisão de literatura., Uberlândia, 2022.
- PILON-SMITS, E., PHYTOREMEDIATION. *Annual Review of Plant Biology*, v. 56; n. 1, p. 15–39; 2005.
- PIRES F. R., SOUZA C. M., SILVA A. A., PROCÓPIO S. O., FERREIRA L. R., Fitorremediação de solos contaminados com Herbicidas; **Planta Daninha**, Viçosa-MG, v. 21, n. 2, p. 335-341, 2003.
- PIRES F. R., SOUZA C. M., SILVA A. A., QUEIROZ M. E. L. R., PROCÓPIO S. O., SANTOS, J. B., ... CECON P. R., Seleção de plantas com potencial para fitorremediação de tebuthiuron. **Planta Daninha**, v. 21; n. 3, 451–458; 2003.
- PIRES F. R.; SOUZA C. M.; SILVA A. A. et al., Seleção de plantas tolerantes ao tebuthiuron e com potencial para fitorremediação. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 50, p. 583-594, 2003.
- POLIŃSKA, W., KOTOWSKA, U., KIEJZA, D., & KARPIŃSKA, J., Insights into the Use of Phytoremediation Processes for the Removal of Organic Micropollutants from Water and Wastewater; **A Review. Water**, v. 13; n. 15, 2021.
- PRASAD, M. N. V. and Strzalka, K. (eds.); *Physiology and Biochemistry of Metal Toxicity and Tolerance in Plants*. Kluwer Academic Publishers, Boston, MA; 2002.
- PROCÓPIO, S. O., SANTOS, J. B., PIRES, F. R., SILVA, A. A., SANTOS, E. A. e FERREIRA, L.R., *Stilozobium aterrimum*; Fitorremediação de solo contaminado com trifloxysulfuron-sodium por mucuna-preta (*Stizolobium aterrimum*); **Planta Daninha**, Viçosa-MG, v. 23, n. 4, p. 719-724, 2005.
- QU, R., HE, B., YANG, J., LIN, H., YANG, W., WU, Q., ... YANG, G., Where are the new herbicides? **Pest Management Science**, v. 77; n. 6, 2620–2625; 2021.
- RASKIN, I., KUMAR, P. N., DUSHENKOV, S., & SALT, D. E., Bioconcentration of heavy metals by plants. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 5; n. 3, p. 285–290; 1994.
- RAJIV, K.S., DALSUKH, V., SHANU, S., SHWETA, S., SUNIL, H., 2009. Bioremediation of contaminated sites: a low-cost nature's biotechnology for environmental clean-up by versatile microbes, plants & earthworms. In: *Solid Waste Management and Environmental Remediation*. **Nova Science Publishers**. Ramseur, J., Hagerty, C.L., 2013.
- ROBINSON, B. H., BAÑUELOS, G., CONESA, H. M., EVANGELOU, M. W. H., & SCHULIN, R., The Phytomanagement of Trace Elements in Soil. *Critical Reviews in Plant Sciences*, v. 28; n. 4, p. 240–266; 2009.
- RODRÍGUEZ-EUGENIO, MC LAUGHLIN N., PENNOKCK., *Soil Pollution: a Hidden Reality*; **FAO**; Rome; 2018.
- ROMEIRO, S.; LAGÔA, A. M. M. A.; FURLANI, P. R.; ABREU, C. A. & PEREIRA, B. F. F. Absorção de chumbo e potencial de fitorremediação de *Canavalia Ensiformes* L. *Bragantia*, Campinas, v. 66, n. 2, p. 327- 334, 2007.
- ROONGTANAKIAT N., TANGRUANGKIAT S., MEESAT R., Utilization of vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*) for removal of heavy metals from industrial waste waters. **Sci Asia** 33:397–403; 2007
- SALT, D.E., BLAYLOCK M., KUMAR P.B.A., DUSHENKOV V., ENSLEY B.D., CHET I., RASKIN I., Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. **Bio/Technology**; 1995.
- SANTOS J. B. dos., PROCÓPIO S. de O., SILVA A. A., PIRES F. R., JÚNIOR J. I. R., SANTOS E. A. dos., Seletividade do Herbicida Trifloxysulfuron Sodium para fins de fitorremediação; **Revista Ceres**, v. 51 (293); 129-141; 2004.
- SEMPLE K. T., MORRISS A. W. J., PATO G.I., Bioavailability of hydrophobic organic contaminants in soils: fundamental concepts and techniques for analysis. **Eur J Soil Sci**. v. 54; n. 4; p. 809–818; 2003.

- SHMAEFSKY B. R., Principles of Phytoremediation; Phytoremediation: In-Situ Applications; Springer; B. R. Shmaefsky (ed.), **Phytoremediation, Concepts and Strategies in Plant Sciences**; 2020.
- SINGH N., Ma L. Q., Assessing Plants for Phytoremediation of Arsenic-Contaminated Soils; Phytoremediation, Methods In Biotechnology; Chapter 24; v. 23: **Phytoremediation: Methods and Reviews**; 2007.
- SOUSA C. H. C., LACERDA C. F. de; SILVA F. L. B. da; NEVES A. L. R., COSTA R. N. T., GHEYI H. R., Yield of Cotton/Cowpea and Sunflower/Cowpea crop rotation systems during the reclamation process of a saline-sodic soil; **Eng. Agríc., Jaboticabal**, v. 34, n. 5, p. 867-876, 2014.
- SOUSA R. R., Crescimento, tolerância e potencial fitorremediador de *Canavalia ensiformis* L. em solo contaminado por cobre e zinco; 2021.
- SOUTO A. R. R., Estudo do capim vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) na área ambiental: revisando aplicações; 2022.
- SOUTO K. M., JACQUES R. J. S., ZANELLA R., MACHADO S. L. DE O., BALBINOT A. & AVILA L. A. DE A., Phytostimulation of lowland soil contaminated with imidazolinone herbicides, **International Journal of Phytoremediation**; 2020.
- SOUZA L. A. de., Potencial fitorremediador de leguminosas herbáceas associadas a fungos micorrízicos arbusculares em solo contaminado com chumbo; 2010.
- SOUZA R. de; Caracterização da comunidade bacteriana associada ao cultivo de arroz (*Oryza sativa*) e estudo da interação bactéria-planta na promoção do crescimento vegetal; 2013
- SOUZA, B., VASCONCELOS, S., RODRIGUES, A., COUTO, B. Y NASCIMENTO, L., Fitorremediación de diferentes contaminantes del suelo. **Ingeniería Ambiental**, v. 2; n. 1, p. 43; 2021.
- SOUZA, C. da C. B. de., Fitorremediação de Solos com Resíduo do Herbicida Diclosulam; Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.
- TAVARES, S. R. De L. Fitorremediação em solo e água de áreas contaminadas por metais pesados provenientes da disposição de resíduos perigosos., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- TELHADO M. C., LEITE S. G. F., RIZZO A. C. de L., REICHWALD D., Avaliação da biodisponibilidade de contaminantes orgânicos em solo contaminado; **Séria Tecnologia Ambiental**; STA-56; 2010.
- THAMPATTI M. K. C., BEENA V. I., MEERA A. V., AJAYAN A. S., Phytoremediation of Metals by Aquatic Macrophytes; Phytoremediation: In-Situ Applications; Springer; B. R. Shmaefsky (ed.), **Phytoremediation, Concepts and Strategies in Plant Sciences**; 2020.
- THE EUROPEAN PLANT SCIENCE ORGANISATION. The European Bioeconomy in 2030: Delivering Sustainable Growth by addressing the Grand Societal Challenges; 2011.
- TSUKAMOTO, T.; NAKANISHI, H.; KIYOMIYA, S. et al. Mn translocation in barley monitored using a positron-emitting tracer imaging system. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 52, n. 6, p. 717-725, 2006.
- UDDIN M. K. & JURAIMI., Salinity Tolerance Turfgrass: History and Prospects; **Hindawi Publishing Corporation The Scientific World Journal**; 2013.
- ULLAH, A., HENG, S., MUNIS, M. F. H., FAHAD, S., & YANG, X., Phytoremediation of heavy metals assisted by plant growth promoting (PGP) bacteria: A review. **Environmental and Experimental Botany**, 28–40; 2015.
- VAMERALI, T., BANDIERA, M., & MOSCA, G., Field crops for phytoremediation of metal-contaminated land. A review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 8; n. 1, p. 1–17; 2009.
- VANGRONVELD, J., HERZIG, R., WEYENS, N., BOULET, J., ADRIAENSEN, K., RUTTENS, A., MENCH, M., Phytoremediation of contaminated soils and groundwater:

- lessons from the field; **Environmental Science and Pollution Research**, v. 16; n. 7, p. 765–794; 2009.
- VAN NEVEL, L., MERTENS, J., OORTS, K., & VERHEYEN, K., Phytoextraction of metals from soils: How far from practice? **Environmental Pollution**, v. 150; n. 1, p. 34–40; 2007.
- VASCONCELOS M. A., JAKELAITIS A., PEREIRA L. S., OLIVEIRA G. S., SOUSA G. D. DE, & LIMA S. F., Seleção de plantas tolerantes ao imazapic para potencial uso na fitorremediação. **Revista Brasileira De Ciências Agrárias**, v. 15; n. 2, p. 1-10; 2021.
- VASCONCELOS M. A., JAKELAITIS A., COSTA M. L. M., OLIVEIRA R. R. C. de; SANTOS V. S., Seleção de espécies tolerantes para a fitorremediação de solo contaminado com imazapic; **Revista de Ciências Agroveterinárias**; v. 19; n. 2; 2020.
- VENDRUSCOLO D., Seleção de plantas para fitorremediação de solo contaminado com cobre; 2013.
- WANG G. D., CHEN X. Y., Detoxification of Soil Phenolic Pollutants by Plant Secretory Enzyme; *Phytoremediation, Methods In Biotechnology*; Chapter 4; v. 23: **Phytoremediation: Methods and Reviews**; 2007.
- WATT N. R., Testing Amendments for Increasing Soil Availability of Radionuclides; *Phytoremediation, Methods In Biotechnology*; Chapter 11; v. 23: **Phytoremediation: Methods and Reviews**; 2007.
- WASE, J., FORSTER, C., *Biosorbents for Metal Ions*, first ed. Taylor and Francis, London; 1997.
- WEI, S., TEIXEIRA DA SILVA, J. A., & ZHOU, Q. (2008). Agro-improving method of phytoextracting heavy metal contaminated soil. **Journal of Hazardous Materials**, v. 150; n. 3, p. 662–668; 2008.
- WEI, X., LYU, S., YU, Y., WANG, Z., LIU, H., PAN, D., & CHEN, J., Phylloremediation of Air Pollutants: Exploiting the Potential of Plant Leaves and Leaf-Associated Microbes; **Frontiers in Plant Science**, v. 8; 2017.
- WHITE J. C., ZEEB B. A., *Plant Phylogeny and the Remediation of Persistent Organic Pollutants*; *Phytoremediation, Methods In Biotechnology*; Chapter 6; vol. 23: **Phytoremediation: Methods and Reviews**; 2007.
- WHITING, S. N., DE SOUZA, M. P., & TERRY, N., Rhizosphere Bacteria Mobilize Zn for Hyperaccumulation by *Thlaspi caerulescens*. **Environmental Science & Technology**, v. 35; n. 15; 3144–3150; 2001.
- YAVARI, S., MALAKAHMAD, A., & SAPARI, N. B., A Review on Phytoremediation of Crude Oil Spills. **Water, Air, & Soil Pollution**; 2015.
- ZHANG X, XIA H, LI Z, ZHUANG P, GAO B., Potential of four forage grasses in remediation of Cd and Zn contaminated soils. *Bioresour Technol*; 2010.