

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA
E TECNOLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL
Campus Ibirubá**

LUIZ FELIPE SCHEFFER

**USO DA BIORREMEDIAÇÃO COMO ALTERNATIVA PARA
RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS**

**Ibirubá, RS,
2023**

LUIZ FELIPE SCHEFFER

**USO DA BIORREMEDIAÇÃO COMO ALTERNATIVA PARA
RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado junto ao curso Bacharelado em Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Ibirubá, como requisito parcial da obtenção do grau de Engenheiro Agrônomo

Orientadora: Suzana Ferreira da Rosa

Ibirubá, RS

2023

RESUMO

Os modelos econômicos e de uso do meio ambiente em todo o mundo têm gerado impactos significativos e preocupantes para a sustentabilidade. A degradação do solo por metais pesados causa muitas consequências, comprometendo a vida como um todo. A biorremediação trata-se de um processo que, utilizando organismos vivos possibilita a recuperação da área degradada eliminando o excedente do metal prejudicial, controlando a degradação. Este estudo, de cunho bibliográfico, apoiado por pesquisas já realizadas e documentadas, consolida-se na importância de conhecer as melhores formas de recuperar os solos contaminados usando o processo da biorremediação, buscando uma melhor produtividade agrícola e melhor qualidade de vida para todos. Nesse sentido, a pesquisa apresenta sugestões de espécies e cultivares a serem utilizadas na descontaminação específica dos metais que degradam o solo com maior frequência e suas potencialidades junto às metas esperadas.

Palavras-chave: solo; ambiente; contaminação

ABSTRACT

The economic models and the use of the environment used around the world have generated significant and worrying impacts on sustainability. Soil degradation by heavy metals causes many consequences, compromising life as a whole. Bioremediation is a process that, using living organisms, enables the recovery of the devastated area, eliminating the surplus of harmful metal, controlling degradation. This bibliographical study, supported by research already carried out and documented, consolidates the importance of knowing the best ways to recover contaminated soils using the bioremediation process, seeking better agricultural productivity and better quality of life for all. In this sense, the research presents suggestions of species and cultivars to be used in the specific decontamination of the metals that degrade the soil more frequently and their potential in relation to the expected goals.

Keywords: soil; environment; contamination

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema das interações de uma célula microbiana com metais representados por m^2)	15
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Metais pesados e locais encontrados	10
Tabela 2- Etapas de um planejamento de recuperação do solo	20
Tabela 3- Mecanismos biológicos de fitorremediação	21
Tabela 4- Espécies vegetais e a respectiva concentração de metal	24
Tabela 5- Indicações de espécies para fitorremediação	26

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
2 DESENVOLVIMENTO	9
2.1 Metodologia	9
2.2 A contaminação de solos agrícolas por metais pesados e herbicidas	9
2.3 Biorremediação	14
2.3.1 Fitorremediação	16
2.3.2 Mecanismos biológicos de fitorremediação	18
2.3.3 Aplicação da técnica de fitorremediação	26
2.4 A fitorremediação em solos contaminados por herbicidas	27
CONCLUSÃO	28
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29

1 INTRODUÇÃO

A degradação do solo vem sendo detectada de forma agravante e consecutiva, atinge diretamente a agricultura e com isso a população como um todo. Essa degradação deve-se ao mau uso do solo, bem como a irresponsabilidade e atitudes inconsequentes por parte de quem utiliza o referido recurso natural. Com isso, torna-se necessário buscar alternativas para minimizar os efeitos negativos decorrentes de práticas degradantes.

Com o objetivo de estabelecer critérios específicos sobre o meio ambiente, existem leis implantadas, em especial para as empresas e também para quem faz uso do solo, como os agricultores, como podemos citar o caso da Lei 6938/1981 (Política Nacional do Meio Ambiente) que estabelece os critérios para a utilização do meio ambiente, controlando os impactos ocasionados por atividades potencialmente poluidoras. Também a Lei 9605/1998 (Lei dos crimes ambientais) dispõe sobre as penalidades para condutas que causem degradação ambiental. A Lei 12 651/2012 (Código Florestal) que dispõe sobre as florestas e demais formas de vegetação nativas, impondo limitações ao uso do solo para sistemas produtivos. São leis que orientam a utilização dos recursos naturais e estabelecem linhas de alerta para que a degradação não continue e se busque possibilidades de minimizar a degradação e recuperar os recursos, no caso desse estudo, o solo, aplicando técnicas que auxiliem essa recuperação, as quais tornam-se fundamentais, o conhecimento dessas, para executar as técnicas necessárias à sua recuperação, com uso da remediação, sem alterar ou provocar outros danos.

Muitos são os estudos que buscam obter informações que na prática podem amenizar essa degradação do solo, bem como recuperá-lo a fim de melhorar a produção agrícola bem como proteger o ecossistema e todas as formas de vida. Neste cenário surge a biorremediação, como uma alternativa capaz de tratar e melhorar o solo a partir de organismos vivos (bio) e devolver as condições necessárias à sua recuperação em benefício da natureza ou até mesmo para o desenvolvimento de sistemas produtivos, como o sistema agrícola, por exemplo.

Dessa forma, conhecer os processos de biorremediação é importante para quem utiliza o solo, pois a preservação desse é importante para a continuidade de seu uso e dele retirar o alimento que preserva a vida. Este estudo torna-se uma necessidade para

que essa prática possa ser conhecida e difundida e cada vez mais implementada na recuperação de solos degradados, principalmente por agentes químicos usados em demasia, como os defensivos agrícolas, ou dispostos sem o devido controle, ou acidentalmente. Rigo et al (2014) orienta quanto ao tratamento do lodo (esgoto) e seu processamento,

Quando o lodo é tratado e processado com a redução da presença de elementos contaminantes e de microrganismos patogênicos, este apresenta características que permitem sua utilização agrícola podendo, então ser denominado de biossólido (RIGO et al., 2014, p. 67).

A calda bordalesa trata-se de um eficiente insumo orgânico utilizado para o controle de fungos. Quanto ao seu uso Motta e Taffarel (2008) assim se manifestam:

O seu uso é permitido na agricultura orgânica porque os seus componentes, sulfato de cobre e cal, são pouco tóxicos, além de contribuir para o equilíbrio nutricional das plantas, fornecendo cálcio e cobre. Existem formulações prontas do produto no comércio, porém, pela facilidade de preparo, eficiência e economia, compensa a sua preparação caseira. (MOTTA;TAFFAREL, 2008, p. 3)

Seja qual for a origem do processo poluente, a técnica de biorremediação é uma alternativa potencial para solução deste tipo de poluição do solo.

Diante da importância da técnica de Biorremediação, este Trabalho de Conclusão de Curso, tem como principal objetivo gerar conhecimento relativo à recuperação de áreas degradadas através da bioextração de metais pesados do solo, ou seja, a utilização de espécies vegetais capazes de extrair os metais excessivos do solo, cada uma com sua especificidade, bem como conhecer plantas que sejam promissoras para fitorremediação de solos contaminados quimicamente com metais e agrotóxicos, através do uso de espécies vegetais específicas.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

O presente estudo trata-se de uma pesquisa bibliográfica realizada através da revisão de trabalhos já publicados, artigos científicos e obras (livros) que tratam do tema em questão.

Fonseca (2002,) orienta que a pesquisa bibliográfica parte de estudos e referências já analisadas e que está intimamente ligada ao meio acadêmico. Quanto ao material a ser pesquisado, relata:

[...]meios escritos e eletrônicos, como livros, artigos científicos, páginas de web sites. Qualquer trabalho científico inicia-se com uma pesquisa bibliográfica, que permite ao pesquisador conhecer o que já se estudou sobre o assunto. Existem, porém, pesquisas científicas que se baseiam unicamente na pesquisa bibliográfica, procurando referências teóricas publicadas com o objetivo de recolher informações ou conhecimentos prévios sobre o problema a respeito do qual se procura a resposta (FONSECA, 2002, p. 32).

Assim, essa pesquisa busca embasamento em todas as fontes disponíveis, sejam e-books, material impresso e artigos disponíveis em meios eletrônicos, em especial das plataformas: Science direct, Periódico CAPES, Google acadêmico, bem como pesquisas em Bibliotecas.

2.2 A contaminação de solos agrícolas por metais pesados e herbicidas

No estudo dos indicadores globais dos ecossistemas e do ambiente, a qualidade do solo tem importância tal qual a água e o ar, estando relacionada diretamente ao ecossistema e a saúde. Assim, a qualidade do solo está diretamente ligada a sua produtividade e ao equilíbrio ambiental (GOMES, 2016).

Lier (2015) explica que o solo é formado por estruturas variáveis e complexas, resultados das misturas não homogêneas desses componentes, ou seja, a parte física que são os sólidos, os líquidos e os gases presentes nos poros, os quais tornam-se de fundamental importância o conhecimento de todos esses caracteres a fim de analisar e conhecer as características gerais do solo.

A formação do solo se dá pela alteração das rochas e por meteorização química e física, a qual depende dos minerais e sua resistência,

Assim,

Vários fatores determinam a formação do solo. A composição da rocha-mãe, topografia, clima, temperatura, chuva e vento, bem como os processos de evaporação no solo, enquanto que os microrganismos influenciam a sua fertilidade. E ainda o fator tempo, que por exemplo, em condições quentes e húmidas favorece uma maior velocidade de desenvolvimento do solo. Todos estes fatores estão interligados e não podem ser analisados individualmente (MOREIRA, 2006, p 45).

Nesse sentido, orientações sobre a manutenção da qualidade do solo são respaldadas pela legislação brasileira, a exemplo das Resoluções 420/2009 e 460/2013.

O Art 3º da Resolução CONAMA 420/2009 determina:

A proteção do solo deve ser realizada de maneira preventiva, a fim de garantir a manutenção da sua funcionalidade ou, de maneira corretiva visando restaurar sua qualidade ou recuperá-lo de forma compatível com os usos previstos.

Assim, a lei determina que sejam feitas ações visando a prevenção e manutenção dos recursos naturais, no caso, o solo, ou seja, buscar formas de corrigir de acordo com as necessidades pontuais, pois, ao serem detectados a presença de metais pesados e não realizado nenhuma intervenção imediata, o seu uso pode estar comprometido.

A contaminação do solo por metais pesados, como ferro, cobre, cromo, chumbo, zinco, níquel, ferro, manganês, entre outros, os quais representam fatores que interferem diretamente na qualidade do solo, bem como na sua capacidade de manter a produtividade e o equilíbrio do ecossistema,

O solo é considerado contaminado quando apresenta substâncias em quantidade ou concentração que podem produzir efeitos nefastos, direta ou indiretamente, ao homem ou ao ambiente. Embora que os solos possuam capacidade de autodepuração, atenuando os efeitos negativos decorrentes da contaminação, com a acumulação excessiva de contaminantes, quando os limites da autodepuração são ultrapassados, o dano pode ser irreversível (CASTELO-GRANDE; BARBOSA, 2003; RIBEIRO, 2013).

O solo apresenta uma função que é de filtrar os produtos nele dispostos. Dessa forma, os agentes poluidores são retidos remetendo a degradação. (FRIZOLA et al.,

2012). Ou seja, todos os produtos que são colocados no solo são absorvidos e, com isso é de extrema importância ter conhecimentos da composição de todos esses produtos para que o solo não absorva resíduos poluentes.

Muitas são as fontes que contaminam o solo por metais pesados. Zhang et al (2015) *apud* Silva et al (2019) citam as atividades de mineração, esgotos, fundição, indústria e aplicação de fertilizantes agrícolas, os quais liberam esses metais pesados que são retidos pelo solo, podendo causar degradação.

Silva et al (2019) observam que muitos estudos são realizados em solos contaminados, os quais revelam quantidade relativa de vários metais pesados como: arsênio, zinco e cromo provenientes de várias fontes, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Metais pesados e locais encontrados

Metal	Fonte de contaminação
Pb	Sistemas de tratamento de gases residuais; Produção e reciclagem de baterias; Fabricação de eletrônicos; Indústria siderúrgica; Tráfego; Fábrica de cimento; Emissões de fábricas; Efluentes de minas de carvão; Atividades de mineração
Zn	Fertilizantes; Tráfego; Fábrica de cimento; Descargas industriais; Fundições de aço; Tingimento de tecidos; Efluentes de minas de carvão; Atividades de mineração
As	Mineração; Inseticida; Fertilização; Fabricação de eletrônicos; Tráfego; Emissão industrial;
Ni	Fabricação de Aço; Materiais de rocha original; Fertilizantes
Cd	Indústria têxtil, metalúrgica e química; Práticas agrícolas; Lixões; Mineração de carvão; Fabricação de eletrônicos e cimento; Fundições de aço; Tráfego; Emissões de fábricas;
Hg	Indústria têxtil, metalúrgica e química; Práticas agrícolas; Tráfego; Fábrica de cimento; Emissão industrial;
Cr	Material parental do solo; Tráfego de veículos; Descargas industriais; Fundições de aço; Detergentes; Fábrica de cimento e couro; Lodo de esgoto; materiais agrícolas;
Cu	Fábrica de cimento; Fundições de aço; Fertilizantes agrícolas
Fe	Indústria siderúrgica; Lodo de esgoto; Minas de ferro; Poeira da mina de carvão
Mn e Sr	Efluentes de minas de carvão

Fonte : SILVA et al (2019)

Conforme a Tabela 1 é possível observar que os fertilizantes agrícolas aparecem como causadores da degradação dos solos, liberando metais pesados, em especial: Zn (Zinco), As (arsênio), Ni (Níquel), Hg (Mercúrio), Cr (Cromo) e Cu (Cobre).

Uma das práticas mais comuns, em vários tipos de cultivos agrícolas, trata-se do uso dos bio sólidos, ou seja, esterco em geral ou lodos de esgotos, os quais apresentam como benefícios incorporar nutrientes ao solo, como: Mo, P, Fe, N, Mn, Zn, Cu, Fe, conforme explicam Betiol et al. (2005).

O lodo de esgoto é capaz de fornecer nutrientes para as culturas. Porém é preciso considerar o risco de toxicidade às plantas e, em certas situações, aos animais e ao homem, atentando também para não se poluir o ambiente (CETESB, 1999).

Basta et. al (2005) advertem que a aplicação de bio sólidos diretamente no solo pode levar ao acúmulo de metais pesados como: As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, Se, Mo, Zn, Ti e Sb. Dessa forma, o uso de esterco com o objetivo de melhorar as características químicas do solo podem promover degradação, tornando-o poluído por esses metais quando utilizado sem um controle efetivo.

Mattias (2006) explica que na fabricação de rações, para animais de corte (bovinos, suínos, aves) são adicionados, em especial Cobre e Zinco os quais vão parar nos dejetos que depositados no solo elevam as quantidades desses metais, podendo contaminá-lo. Além dos fertilizantes, também os agrotóxicos apresentam metais pesados que podem contaminar o solo. Conforme declaram Mirlean et. al. (2017) em pesquisa realizada em áreas de vinícolas onde foi usado agrotóxicos à base de cobre, em clima úmido. Nessa pesquisa, os autores observaram que a área teve um acúmulo de 3200 mg kg⁻¹ de Cu, o que é muito superior ao visto em outras áreas semelhantes. A mesma pesquisa também observou, em áreas de vinhedos com uso de agrotóxicos, o acúmulo de Zn é de até quatro vezes, Pb em cinco vezes e Cd e Cr em oito vezes. O que evidencia o efeito adverso do produto nessas áreas agrícolas.

Com relação aos produtos utilizados na agricultura, o termo agroquímico designa todos os insumos aplicados, ou seja: pesticidas, fertilizantes, herbicidas, inseticidas e outros. O Decreto nº4074/2002 define, no Artigo 1º, inciso IV:

[...] produtos e agentes de processos físicos, químicos ou biológicos, destinados ao uso nos setores de produção, no armazenamento e beneficiamento de produtos agrícolas, nas pastagens, na proteção de florestas, nativas ou plantadas, e de outros ecossistemas e de ambientes urbanos, hídricos e industriais, cuja finalidade seja alterar a composição da flora ou da fauna, a fim de preservá-las da ação danosa de seres vivos considerados nocivos, bem como as substâncias e produtos

empregados como desfolhantes, dessecantes, estimuladores e inibidores de crescimento (BRASIL, 2002).”

A produção dos fertilizantes, geralmente não é suficiente, quando do processo de manufatura, sendo que os metais pesados e impurezas permanecem no produto (AMARAL SOBRINHO et. al, 2012). Também nos pesticidas esses metais são comuns, conforme Santos et al (2002).

Com a chegada dos imigrantes italianos, foi introduzida nos cultivos agrícolas a utilização da calda bordalesa, suspensão coloidal obtida através da mistura sulfato de cobre, hidróxido de cálcio e água. Essa calda possui grande eficiência no controle de doenças na videira, tendo como média 10 aplicações anuais, o que resulta em aproximadamente 30 kg ha⁻¹ ano de cobre no solo segundo Girroto (2010).

Sempre que esses agroquímicos são aplicados ao solo, uma porcentagem fica incorporada (FRIZOLA et al.(2012). Essa incorporação pode ser por não atingir totalmente o que se propunha, pela infiltração através dos líquidos utilizados para dissolvê-los ou evaporados na atmosfera.

Nas áreas de plantas frutíferas o cobre é um importante minério para o solo, porém pode se tornar um degradante (MATTOS 2002). Segundo o autor, sua alta concentração é extremamente tóxica, causando danos aos animais e plantas. Nas áreas contaminadas por Cu, a biorremediação é uma alternativa com bastante viabilidade (Andreazza 2011), no entanto há necessidade de uma boa avaliação e a utilização de organismos resistentes a esse. Andreazza (2011) sugere que seja feito um estudo com plantas que se desenvolvem nas áreas contaminadas pelo elemento e que essas espécies vegetais podem estabilizar a contaminação dessas áreas.

2.3 Biorremediação

A biorremediação corresponde ao uso, de maneira tecnológica de organismos vivos, como bactérias, fungos e plantas e suas enzimas com a finalidade de reduzir ou remover os poluentes do ambiente. (YAKUBU,2007). Para o autor o conceito de biorremediação trata do uso da biotecnologia, sendo utilizado microrganismos e seu processo metabólico para que eliminem os poluentes, reduzam a concentração desses, deixando-os ao menos no limite aceitável, diminuindo a toxicidade desses compostos

A biorremediação é um processo de tratamento ativo que usa microrganismos para degradar biologicamente (remover ou reduzir), imobilizar, ou transformar os contaminantes, presentes tanto em águas subterrâneas quanto em solos, em substâncias finais de menor toxicidade (CHEN et al., 2015; PARK et al., 2011; REDDY; ADAMS, 2015).

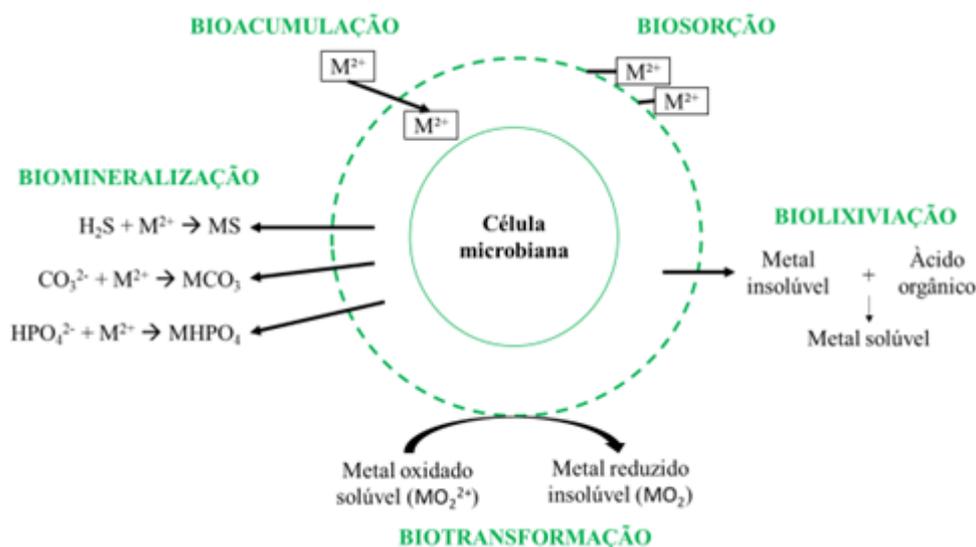
A biorremediação também pode ser caracterizada como uma técnica mais comumente utilizada para a degradação de substâncias orgânicas, porém, vem se mostrando uma técnica promissora para o tratamento de resíduos inorgânicos tais como os metais tóxicos, entretanto, a complexidade é maior, uma vez que os metais não são absorvidos nem capturados pelos microrganismos, nem podem ser degradados quimicamente e/ou biologicamente (ROCHA et al., 2009; SILVA et al., 2014).

As principais técnicas de biorremediação de solos contaminados com metais tóxicos estão associadas à biolixiviação, biomineralização, biotransformação, bioacumulação e biossorção (Figura 1), cujos mecanismos incluem principalmente transformação de valência, volatilização e precipitação química extracelular (WU et al., 2010)

Na biolixiviação os microrganismos são capazes de dissolver os metais de sua fonte mineral, modificando o estado de oxidação química destes elementos, para elementos solúveis, de modo que estes possam ser extraídos do solo, quando há a passagem de água através dele. Portanto, a biolixiviação age na solubilização e mobilidade dos metais tóxicos (SCHENBERG, 2010).

Com a aplicação de técnicas de biomineralização os microrganismos excretam substâncias que provocam a precipitação dos metais sob uma forma insolúvel, reduzindo a sua mobilidade no solo. Neste mesmo sentido vem a biotransformação, na qual o microrganismo age sobre o metal solúvel, alterando suas características químicas, tanto na redução da toxicidade quanto o tornando insolúvel o que influencia na sua mobilidade no solo

Figura1 : Esquema das interações de uma célula microbiana com metais representados por m^2).



Fonte: Wu et al., 2010

Na bioacumulação, os microrganismos internalizam os íons metálicos por meio de processos de transporte de metais essenciais ao metabolismo microbiano com potencial para complexar metais, removendo o metal do solo, sendo que, uma levedura muito utilizada para este processo é a *Saccaromyces cereviseae*

A biossorção, embora seja mais utilizada na descontaminação de águas s, já constitui uma abordagem ampla para solos, e ocorre quando os microrganismos adsorvem passivamente os íons metálicos sobre a superfície celular, uma vez que, a estrutura da parede celular de certos fungos e bactérias, agente responsável pela formação de complexos metal-orgânicos, pode acumular um excesso de 25% de seu peso seco em metais (BARKAY; SCHAEFER, 2001; ROCHA et al., 2009; CHEN, et al., 2015).

Lacerda et. al (2019) sugerem a atenção para o emprego de técnicas de biorremediação, seguindo etapas, como:

- I. Estudo das características biológicas, geofísicas e hidrológicas do ambiente;
- II. Análise do tipo e quantidade do poluente e/ou contaminante
- III. Avaliação dos riscos;
- IV. Observação da legislação vigente.

Ressalta-se que essas etapas são importantes para uma eficiente obtenção de resultados, pois são cuidados imprescindíveis, a fim de determinar a exata necessidade da quantidade de agentes biológicos e quais os necessários para a recuperação do solo.

Para que haja eficiência no uso da biorremediação é importante estar atento que:

O poluente seja transformado metabolicamente por algum microrganismo; os produtos finais sejam seguros; as condições ambientais favoreçam a atividade microbiana; o processo deve ter uma relação custo/benefício interessante (LACERDA, et al, 2019)

Nesse sentido, ao usar a biorremediação para recuperar o solo, torna-se necessário fazer a análise e considerar realmente as necessidades do solo.

Lacerda et. al. (2019) alertam que a biorremediação não se trata de uma técnica simples e que a mesma apresenta vantagens e também limitações, as quais devem ser visualizadas pelo profissional atuante. Entre as vantagens, cita-se:

Capacidade de microrganismos biodegradarem substâncias nocivas em vez de transferir o contaminante de um meio a outro; baixo custo, quando comparado a outras técnicas de remediação; elevada diversidade de ação, permitindo a incorporação dessa técnica a uma variedade de agentes contaminantes e poluentes; capacidade de degradar substâncias perigosas em vez de apenas transferir o contaminante de um meio para outro; produtos utilizados não apresentam risco ao meio ambiente e não são tóxicos; uso em áreas de proteção ambiental. (IDEM, 2019, p.17)

Dessa forma, percebe-se que a biorremediação se trata de uma prática que, usada no solo, protege as águas, o ar, diferente dos produtos químicos que podem tratar o solo e comprometer os lençóis freáticos, as águas e o ar.

Como limitações para a aplicação da biorremediação, cita-se:

Necessidade de um melhor entendimento em relação à ação microbiológica sobre os resíduos a serem biorremediados; Método em evolução no Brasil; Necessidade de acompanhamento durante o processo; Muitas moléculas não são biodegradáveis; Substâncias tóxicas ao microrganismo inviabilizam o tratamento. (IDEM , 2019, p. 17).

Por ser uma prática recente, torna-se necessário atenção e estudo, analisando especificamente e minuciosamente os agentes contaminadores, bem como as escolhas das espécies que condizem com tal necessidade.

2.3.1 Fitorremediação

A fitorremediação consiste no uso de espécies vegetais para capturar, transportar, armazenar e imobilizar metais, no intuito de descontaminar in situ solos contaminados com metais tóxicos, principalmente, Pb, Ni, Hg, Zn, Cu, Se, U e Cs). A fitorremediação possui além da vantagem do baixo custo, o poder de embelezar o

ambiente, entretanto, o tempo para se obter resultados satisfatórios pode ser bastante longo (MULLIGAN et al., 2001; ROCHA et al., 2009). A fitorremediação é uma tecnologia relativamente nova que visa a remediação dos solos contaminados através do uso de plantas, com o custo razoável, baixo impacto ambiental e de grande aceitação pública (NASCIMENTO, et al., 2009).

De acordo com Ojuederie e Babadola (2017), as plantas possuem mecanismos biológicos que lhes permitem sobreviver sob estresse de metais tóxicos, ou seja as plantas capturam a fração biodisponível destes elementos, a qual é passível de ser transportada através das raízes, concentrando-a nas fibras vegetais (raiz, caule e folhas principalmente).

A fitoextração, fitoestabilização, fitovolatilização e rizofiltração são as técnicas de fitorremediação aplicadas principalmente para a remediação de metais. A fitoextração envolve a absorção dos contaminantes pelas raízes das plantas, sendo transportados e armazenados nas partes aéreas, sendo que, após o crescimento, as plantas são cortadas e dispostas adequadamente, ou levadas para a reciclagem dos metais, ou seja, o objetivo da fitoextração é retirar os elementos do solo a partir de podas sucessivas da parte aérea das plantas. A rizofiltração é uma técnica semelhante à fitoextração, cujas raízes das plantas concentram e precipitam os metais sob formas menos tóxicas. Na fitoestabilização, os contaminantes são assimilados pela lignina da parede vegetal, e os metais são precipitados sob formas insolúveis e menos biodisponíveis, reduzindo a mobilidade destes no solo. Na aplicação da fitovolatilização, os elementos como mercúrio, selênio e arsênio são absorvidos pelas raízes, convertidos em formas não-tóxicas e depois liberados na atmosfera (MULLIGAN et al., 2001; ROCHA et al., 2009; TAVARES, 2013).

O sucesso desta técnica de fitoextração é essencial para que o solo não apresente altos níveis de contaminação e que a planta seja tolerante ao metal em questão, apresente um sistema radicular abundante, que possua uma taxa de crescimento rápido, tenha o potencial de produzir alta quantidade de biomassa no campo e que acumule na parte aérea elevadas quantidades do metal (Marques et al., 2009). A fitoextração, uma abordagem mais prática, visa a utilização de plantas com capacidade natural de acumulação de altas quantidades de metais, mas normalmente com baixa produção de biomassa (plantas hiperacumuladoras); ou a utilização de plantas com alta produção de biomassa, mas com menor capacidade de acumulação de metais normalmente associada a aplicação de agentes quelantes (NASCIMENTO

et al., 2009) pois após o crescimento no campo as plantas podem ter seu volume reduzido por compostagem ou incineração e posteriormente, serem recicladas (biomineração) ou distribuídas em solos com baixos teores de metais pesados ou depositadas em aterro sanitário. Outra alternativa é a utilização das plantas para a produção de bioenergia, citado por MARQUES et al., 2011. As plantas adequadas para a fitoestabilização devem ser tolerantes às condições de solo, crescer rapidamente para estabelecer densa cobertura vegetal, ter sistemas radiculares densos, para que assim possam absorver grandes quantidades do metal mantendo-o nas raízes (baixa translocação raiz-parte aérea), serem fáceis de estabelecer e manter em condições de campo, e ter ciclos de vida longos ou serem capazes de auto-propagar (SANTIBÁÑEZ et al., 2008).

De acordo com Vendrúsculo (2013) para a cobertura de inverno, o cultivo da aveia preta (*Avena strigosa* Scherb) com as cultivares capazes de tolerar a alta concentração de Cu são as seguintes: Vacaria, Moreninha, Passo Fundo, IPFA 99009, BRS Centauro, e SS; a aveia branca (*Avena sativa*) com as cultivares URS 21, UPF 18 e UPF22, a Ervilhaca peluda (*Vicia villosa* Roth com a SS esmeralda. Ou seja, que apresentam diferentes doses de Cu, sendo aos 0, 100, 200, 400 mg kg⁻¹ de solo. O genótipo da Ervilhaca peluda da cultivare SS esmeralda foi a que mais acumulou Cu na parte aérea da planta, ao que, Vendrúsculo (2013) classifica como fitoextratora, tolerante ao metal, além de produzir biomassa e ter crescimento rápido. O autor cita ainda as cultivares Vacaria e IPFA 99009, da Aveia branca para serem fitoestabilizadoras, visto que apresentaram acúmulo de Cu nas raízes com baixa translocação para as demais partes da planta, pois os metais ligam-se com facilidade e permanecendo na raiz são imobilizados evitando a poluição de outras partes.

2.3.2. Mecanismos biológicos da fitorremediação

Quanto aos mecanismos usados da fitorremediação, Tavares (2016) explica que os vegetais atuam de forma direta ou de forma indireta para reduzir e ou remover os contaminantes do solo. Na fitorremediação direta “os compostos são absorvidos e acumulados ou metabolizados nos tecidos, através da mineralização dos mesmos enquanto que na indireta “os vegetais extraem contaminantes das águas subterrâneas, reduzindo assim a fonte de contaminação ou quando a presença de plantas propicia meio favorável ao aumento da atividade microbiana” (IDEM, 2016).

As descobertas e estudos vêm mostrando a possibilidade de microrganismos versáteis, capazes de catabolizar moléculas de degradação do solo. Estudos na área da biotecnologia indicam a existência de bactérias e de fungos que se apresentam eficientes e capazes de exercer a degradação dos poluentes com potencialidade de recuperar o solo contaminado. (BALAN, 2014).

Meyer (1998) acentua que a utilização de bactérias, fungos e outros organismos vivos e a eficiência de cada um depende da presença de enzimas capazes de degradar os produtos, bem como da estrutura da molécula específica para essa finalidade. Gaylard, et. al. (2005) reafirmam a efetivação da bioremediação se dá por esse mecanismo e que depende da estrutura química de xenobiótico, (elemento presente no solo em quantidade além do normal) ter as moléculas semelhantes aos naturais. O processo microbiano, através da utilização de microrganismos que reciclam as moléculas da biosfera é o processo metabólico que tem apresentado melhores resultados na biodegradação tanto de moléculas xenobióticas quanto nas recalcitrantes (de degradação difícil). (GAYLARD et. al, 2005).

Se as enzimas que catabolizam a degradação de compostos naturais apresentam baixa especificidade pelo seu substrato, os xenobióticos com estrutura química semelhante a estes compostos naturais podem ser reconhecidos pelo sistema ativo da enzima e, assim, aproveitados pelo micro-organismo como fonte de nutrientes e energia (GAYLARD et.al., 2005, p.45).

2.3.3 Aplicação da técnica de fitorremediação

Tavares (2016) considera o aspecto relativo aos custos, de extrema importância no uso da remediação e recuperação do solo por metais pesados, enfatizando que a fitorremediação apresenta menos gastos, com relação a outros métodos, conforme exemplificado na tabela abaixo.

Tabela 2 Comparação de custos de métodos para recuperar solos degradados por metais pesados

Tipo de tratamento	Custo variável/ton (US\$)
Fitorremediação	10-35
Biorremediação in situ	50-150
Aeração no solo	20-200
Lavagem do solo	80-200
Incineração	200-1500

Fonte: Tavares (2016)

Tavares (2016) adverte que independentemente do método a ser aplicado para recuperação do solo degradado por metais é necessário conhecer todas as características desse, bem como estar alerta ao que confere a legislação vigente.

A Lei 6938 de 31 de agosto de 1981 dispõe sobre a política do Meio Ambiente e apresenta:

Art 2º - A Política Nacional do Meio Ambiente tem por objetivo a preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental propícia à vida, visando assegurar, no País, condições ao desenvolvimento socioeconômico, aos interesses da segurança nacional e à proteção da dignidade da vida humana. (BRASIL, 1981).

Nesse sentido, o Decreto 9632/ 89, regulamentado pela Lei 6938/81, apresenta:

Art. 2º Para efeito deste Decreto são considerados como degradação os processos resultantes dos danos ao meio ambiente, pelos quais se perdem ou se reduzem algumas de suas propriedades, tais como, a qualidade ou capacidade produtiva dos recursos ambientais.

Art. 3º A recuperação deverá ter por objetivo o retorno do sítio degradado a uma forma de utilização, de acordo com um plano preestabelecido para o uso do solo, visando a obtenção de uma estabilidade do meio ambiente. (BRASIL,1989).

Dessa forma, torna-se sempre necessário o planejamento, conforme sugere Guimarães (2007), levando em consideração etapas importantes, conforme demonstrado abaixo:

Tabela 1– Etapas de um planejamento de recuperação do solo

Etapas	Característica
Método da operacionalização	Definição do instrumento que irá utilizar
Análise dos indicadores a serem analisados no solo	Definição dos metais diagnosticados
Identificação dos riscos e impactos	Formação do banco de dados
Definição da área	Definição da área total e das espécies a serem utilizadas
Proposição dos instrumentos e das medidas a serem adotadas	Execução das ações planejadas

Fonte- GUIMARÃES (2007)

Dessa forma, o uso da fitorremediação deve ser considerado a busca de resultados na preservação/recuperação do solo, atrelados à definição de ambiente sustentável, onde a preservação da vida e da biodiversidade seja primordial na tomada de decisões. Assim, o planejamento das ações e do uso da fitorremediação

deve considerar todos os critérios para que a escolha dos organismos a serem utilizados sejam pautados por critérios prioritários de relevância diante do processo da escola. (SILVA, 2013). De acordo com Procópio et al. (2019) existem oito processos pelos quais pode ser dividido os mecanismos biológicos da fitorremediação. Porém, esses processos não são isolados e podem ocorrer de maneira sequencial ou simultânea. A tabela abaixo (Tabela 3 apresenta as características morfofisiológicas e a descrição do processo.

Tabela 3. Mecanismos biológicos de fitorremediação

MECANISMO	DESCRIÇÃO DO PROCESSO
Fitoextração	Absorção do contaminante presente no ambiente pela espécie vegetal
Fitoacumulação	Armazenamento do contaminante nas raízes ou em outros órgãos, sem modificação nas moléculas do xenobiótico (aprisionamento). Ocorre após a fitoextração
Fitodegradação	Bioconversão do contaminante em formas menos tóxicas ou não-tóxicas nas raízes ou em outros órgãos dos vegetais; em alguns casos a transformação ocorre de forma intensa, resultando na mineralização do xenobiótico. Ocorre após a fitoextração, ou mesmo após a fitoacumulação
Fitovolatilização	Volatilização de um contaminante fitotransformado a uma forma volátil, a qual é liberada na atmosfera. Ocorre após a fitoextração, ou mesmo após a fitoacumulação
Fitoestimulação	Estimulação à concentração/ativação de comunidade microbiana apta a biodegradar o contaminante, resultado da produção e liberação de exsudatos radiculares pela espécie vegetal
Rizodegradação	Biodegradação do contaminante pela comunidade microbiana associada à rizosfera da espécie vegetal. Normalmente ocorre após a fitoestimulação
Rizovolatilização	Volatilização de um contaminante rizotransformado a uma forma volátil, a qual é liberada na atmosfera
Rizoestabilização	Imobilização, lignificação ou humificação do contaminante na rizosfera da espécie vegetal, ficando o contaminante inativo no solo, mesmo que preservando sua integridade molecular

Fonte: PROCÓPIO et al. (2019)

2.3.4 Fitoextração

Na fitoextração são utilizadas espécies de plantas que são capazes de absorver o metal contaminante do solo, armazenando nas raízes, caule e folhas. (BACKER, 2000, apud TAVARES (2016). Entre as vantagens desse mecanismo é a absorção de mais de um contaminante por uma mesma planta. (IDEM, 200).

Elias (2003) realizou um estudo onde apresenta as espécies capazes de acumular metais pesados e a respectiva medida de concentração do metal.

Tabela 4- Espécies vegetais e a respectiva concentração de metal

Metal	Espécie vegetal	mg kg⁻¹
Cd	<i>Thlaspi caerulenses</i>	1.800
Cu	<i>Aeolanthus mucronata</i>	3.920
Cu	<i>Bulbostylis mucronata</i>	10200
Co	<i>Cyanotis longifoliaire</i>	4200
Co	<i>Haumaniastrum roberti</i>	10200
Pb	<i>Thlaspi rotundifolium</i>	8200
Pb	<i>Polycarpeae synandra</i>	1044
Pb	<i>Armeria marítima</i>	1600
Mn	<i>Macadamia neurophylla</i>	51800
Mn	<i>Naytenus bureauvianus</i>	33800
Mn	<i>Alixia rubricaulis</i>	11500
Ni	<i>Psychotria douarei</i>	4700
Ni	<i>Dichapetalum gelonoides</i>	33000
Ni	<i>Alyssum bertolonil</i>	13400
Zn	<i>Thlaspi caerulenses</i>	51600
Zn	<i>Thlaspi calaminarae</i>	39600
Zn	<i>Cardaminospsis halleri</i>	13600
Se	<i>Astragalus e Staleya</i>	1000

Fonte Elias (2003)

A revegetação de áreas florestais nativas degradadas ou contaminadas, do estado do Rio Grande do Sul vem sendo dificultada devido ao lento crescimento das plantas utilizadas. Em outro extremo, a contaminação de solos por cobre tem se tornado comum no sul do Brasil (NACHTIGALL et al., 2007). Sabe-se que a contaminação do solo por metais pode causar redução da atividade microbiana do solo (DIAS JUNIOR et al, 1998) e alterar a composição das espécies de fungos

micorrízicos (RÜHLING; SÖDERSTROM, 1990), ocasionando desestruturação da vegetação.

Uma das práticas comuns, na agricultura atual trata-se do uso de herbicidas para o controle de ervas daninhas. Segundo Faostat (2028), são os herbicidas, o mais consumido no mundo, na classe dos agrotóxicos. Diante dessa constatação torna-se necessário alertar-se quanto aos prejuízos que esses acarretam ao solo, pois,

Após a aplicação, os herbicidas podem seguir diferentes destinos, governados por processos como sorção, lixiviação e escoamento superficial, degradação química e, ou biológica e a absorção pelas plantas, podendo também, ocorrer interação entre os respectivos processos (MANCUSO et al., 2011, CARA et al., 2017).

É neste cenário que a biorremediação apresenta um papel importante, pois conforme alerta Chelinho et al. (2010) a maioria dos herbicidas apresentam uma longa duração, persistindo no combate das ervas daninhas por um longo período e a Biorremediação apresenta-se como uma técnica eficiente, de baixo custo descontaminando o solo. (IDEM, 2010).

Procópio e Outros (2019) indicam as espécies vegetais a serem utilizadas nos programas de recuperação do solo pela fitorremediação (Tabela 2), salientando que o ideal é buscar reunir todas as características em uma espécie ou buscar a que reúna ou assemelhe-se mais aos caracteres evidenciados. Miler (2006) também sugere a utilização de várias espécies, cada uma com características diferentes, buscando aliar todos os caracteres desejáveis para descontaminação.

Quadro 1 Indicações de espécies para fitorremediação

-
1. Sistema radicular profundo e denso
 2. Alta taxa de crescimento e produção de biomassa.
 3. Capacidade transpiratória elevada, especialmente em árvores e plantas perenes.
 4. Elevada taxa de exsudação radicular.
 5. Resistência a pragas e doenças
 6. Adaptabilidade ao local a ser remediado (clima e solo).
 7. Fixação biológica de nitrogênio atmosférico.
 8. Alta associação com fungos micorrízicos.
 9. Fácil controle ou erradicação posterior.

10. Quando necessária, facilidade de remoção das plantas da área contaminada.
- . 11. Fácil aquisição ou multiplicação de propágulos.
12. Ocorrência natural em áreas contaminadas.

Fonte: PROCÓPIO et al (2019,)

Tavares (2016) explica que os vegetais apresentam uma capacidade de se adaptar em diversos ambientes, visto que esses aparecem em todos os lugares e apresentam capacidades de realizar simbioses com outros organismos, adaptando-se facilmente em todos os tipos de solos, sejam eles ácidos, salinos, ricos ou pobres em nutrientes ou mesmo contaminados pela presença de metais pesados e ou elementos químicos. Pelo uso da fitorremediação é possível reduzir os teores desses metais a níveis que sejam seguros para as pessoas, bem como efetuar a melhoria do solo, em nível aceitável desses metais para uma melhor produção através de seu uso para o cultivo desejado (IDEM, 2016).

2.4 A fitorremediação em solos contaminados por herbicidas

Os herbicidas surgiram para controlar as plantas daninhas e cada vez vêm possibilitando que esse controle seja por um período cada vez maior, ou seja, com menos aplicações uma durabilidade maior. Porém a fitotoxicidade nas culturas onde o solo é utilizado na sequência das aplicações tem sido observada por mais de três anos. A observação revela que o uso dos herbicidas imazaquin, tebuthiuron, atrazine, trifloxysulfuronmety e fomesafan deixam maiores resíduos contaminantes no solo (SIQUEIRA et al, 1991).

Os solos contaminados por herbicidas demonstram limitações à fitorremediação, se comparados a solos degradados por outros contaminantes, sejam eles orgânicos ou inorgânicos (ANDERSON e al, 2004). Os solos contaminados por herbicidas podem apresentar toxidades às plantas pois,

Os herbicidas aplicados ao solo se movem para a superfície das raízes por fluxo de massa na solução do solo, em resposta à transpiração. Além disso movem-se por difusão e podem entrar em contato com as raízes por interceptação radicular [...]. (PETERSEN et al (2004) apud MARCHI et al, 2008).

Marchi et al. (2008) alertam que os herbicidas apresentam uma longa “vida útil”, ou seja permanecem no solo por muito tempo, o que, na maioria das vezes é considerado positivo pelo produtor que o utiliza, porém é extremamente degradante para o solo, causando o acúmulo de metais pesados que causam a poluição. Porém, pesquisas contribuem com estudo de plantas capazes de mineralizar a atuação do herbicida (ANDERSON et al. (2004). As pesquisas demonstraram que, em solos sem a presença de vegetais a degradação foi maior, especialmente naqueles rizosféricos de K. (Perkovich et al. (1996) apud Pires et al. (2013).

Pires *et al* (2013) (cita o experimento realizado por Coats (1995) no qual constatou-se que *K. scoparia*, *Carduus nutans* e *Nepeta cataria* foram as espécies que apresentaram maior mineralização no solo degradado por herbicidas.

O tebuthiuron foi o primeiro herbicida que despertou as pesquisas para um programa de descontaminação do solo utilizando a fitorremediação (PIRES et. al. (2005, *apud* PROCÓPIO et al., 2019). Este é um herbicida N-{5- (1,1-dimetiletil)-1,3,4-tiadiazol-2-il}-n,n'-dimetiluréia, utilizando em larga escala com cultivo da cana-de-açúcar, sua recomendação é para uso em pré-emergência. Estudos realizados dão conta que este herbicida pode permanecer no solo de 11 à 14 meses (BLANCO; OLIVEIRA, 1987, *apud* PROCÓPIO et. al., 2019). Porém Emmerich et. al. 1984, *apud* PROCÓPIO et al., 2019) alertam que sua permanência no solo pode ser de até 7,2 anos, possível de intoxicar as cultivares sucessivas, bem como a alta probabilidade de contaminar os aquíferos, pois apresenta solubilidade alta em água (2.500 mg – 1° a 2° C).

Ao avaliarem o uso de programas de fitorremediação, Pires e Outros (2008) *apud* Procópio e Outros (2019) utilizaram *Crotalaria juncea* indicando a presença do herbicida tebuthiuron, onde constataram que as espécies feijão-guandu, feijão-porco apresentaram desempenhos satisfatórios na fitorremediação de áreas contaminadas pelo herbicida, enquanto o milheto e a mucuna-preta mostraram resultados intermediários, espécies que podem ser indicadas em solos que apresentam baixo nível de contaminação (máximo de 0,5 kg ha⁻¹).

Na avaliação em solos produtores de soja, a pesquisa constatou que o feijão-deporco, o tremoço-branco e a mucuna-preta, sequencialmente, demonstraram melhores resultados na fitorremediação do xenobiótico em questão.

Leite (2013) orienta quanto a importância de realizar o diagnóstico, através de comparações das alternativas, identificando as características, bem como os impactos

do solo analisado. Assim, torna-se necessário utilizar uma metodologia onde as considerações necessárias estejam expressas ou descritas, comparando e descrevendo os impactos observados a partir dos indicadores já estudados e a análise considerando pessoa, medidas e os índices de valores da qualidade ambiental o qual é obtido pela ajuda de uma equipe multidisciplinar ou profissional habilitado. (IDEM, 2013).

Dessa forma, a partir dos indicadores, da análise e da avaliação dos impactos resultantes da presença de metais pesados no solo, faz-se um estudo, associando os valores obtidos às considerações de qualidade a fim de associar a utilização dos microrganismos à recuperação da área.

3 CONCLUSÃO

Após a realização deste estudo percebe-se que biorremediação surge para dar suporte e proporcionar as intervenções necessárias, favorecendo a recuperação das áreas degradadas por metais pesados, com muitas vantagens, em especial o baixo custo e a possibilidade de intervenções e execução a partir da ajuda do profissional habilitado, com as informações necessárias e execução do processo de forma simples e metodologia facilitada.

Diante dos objetivos propostos para a realização desse estudo bibliográfico percebe-se a importância da análise do ambiente, em especial do solo, para verificar o acúmulo e o tipo de metal presente, bem como a causa e o estágio da degradação a fim de identificar a cultivar que será benéfica para a recuperação do solo.

Muitas são as causas da degradação do solo e poluição por metais pesados. O uso de herbicidas, devido a toxicidade e acúmulo de produtos são determinantes na degradação e poluição do ambiente. Nesse contexto, surge os xenobióticos, capazes de fornecerem estruturas para evoluírem e utilizarem os microrganismos capazes de renovar o ambiente.

Assim, as técnicas de biorremediação com as espécies citadas e já pesquisadas utiliza cultivares com as melhores estratégias pré-definidas de acordo com o metal contaminante, inclusive com bons resultados diante dos impactos ambientais causados especialmente, pelo uso de inseticidas, os quais são persistentes nos solos agrícolas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BACKES, Paulo; IRGANG, Bruno. **Árvore do sul** - Guia de identificação e Interesse Ecológico. 2 ed.. Porto Alegre: Pallotti - Instituto Souza Cruz, 2002, 326p.

BARKAY, Tamar.; SCHAEFER, Jeffra. Metal and radionuclide bioremediation: issues, considerations and potentials. **Current Opinion in Microbiology**, v. 4, p. 318-23, 2001.

BHARGAVA, Atul; CARMONE, Francuco; BHARGAVA, Mienakshi; SRIVASTAVA, Shilpi.. Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals. **Journal of Environmental Management**, v. 105, p. 103-120, 2012. doi:10.1016/j.jenvman.2012.04.002

BERTI, W.R.; CUNNINGHAM, S.D. Phytostabilization os metals. In, RASKIN, I.; ENSLEY, B.B. (eds.). **Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean um the environment**. New York, Wiley, 2000. p.71-88.

CASALE, Carlos Alberto et al. Formas e dessorção de cobre em solos cultivados com videira na Serra Gaúcha do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1479-1487, 2008.

CASTELO-GRANDE, Tereza.; BARBOSA, Domingos. "Soil decontamination by supercritical extraction". *Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry*, v. 2, n. 2, 2003.

CASTELO-GRANDE, T.; AUGUSTO, P. A.; BARBOSA, D. Técnicas de descontaminação de solos: uma revisão. **Revista Ingenium**, Lisboa, 2007.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. **Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas**. São Paulo: CETESB, 2001. Disponível em <https://cetesb.sp.gov.br/escolasuperior/wp->

content/uploads/sites/30/2016/06/Edson_Helio_Matilde.pdf Acesso em 20 abril 2023.

DIAS JÚNIOR, H. E. et al. Metais pesados densidade e atividade microbiana do solo contaminado por rejeitos de indústria de zinco. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 22, n. 4, p. 631-640, 1998.

FERREIRA, Daniel Furtado Programa de análises estatísticas (Statistical Analysis Software) e planejamento de experimentos. Lavras: UFLA, 2003

GIROTTI, Eduardo. **Alterações fisiológicas e bioquímicas em plantas cultivadas em solo com acúmulo de cobre e zinco**. Santa Maria, RS. Universidade de Santa Maria. 2010. 152p. (Tese de Doutorado).

GOMES, Marco A. **Indicadores físicos e químicos de qualidade do solo de interesse agrícola**. Jaguariúna/SP: Embrapa Meio Ambiente, 2006. Disponível em: www.agencia.cnptia.embrapa.br/recursos/Gomes_indicadoresID-uIkeja1HAN.pdf Acesso em 24 maio 2023

LACERDA, Felipe; NAVONI, Julio A.; AMARAL, Viviane S. do. **BIORREMEDIAÇÃO: educação em saúde e alternativas à poluição ambiental**. Ed, IFRN, Natal: RN, 2019.

LIER, Quirigin de J. V. **Cálculo de alguns parâmetros físicos do solo**. USP,2016. Disponível em <www.lce.esalq.usp.br/aula/lce200/Calculo_parametros_solos.pdf. Acesso em 24 maio de 2023.

MARQUES, Ana.; RANGEL, António.; CASTRO, Paula. Remediation of heavy metal contamination soil: phytoremediation as a potentialy clean-up tecnology. **Crit. Reviews. Environmental. Science. Technology.**, v. 39, p. 622-654, 2009.

MARQUES, Marcia.; AGUIAR, Christiane Rosas Chafim; SILVA, Jonatas José Luis Soares. Desafios, técnicos e barreiras sociais, econômicas e regulatórias na

fitorremediação de solos contaminados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1-11, 2011.

MATTIAS, Jorge Luis **Metais pesados em solos sob aplicação de dejetos líquidos de suínos em duas microbacias hidrográficas de Santa Catarina**. 2006. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

MATTOS, Rodrigo Borges **Características qualitativas e possibilidade de ganho de fuste em espécies euxilóforas nativas da região central do Rio Grande do Sul**. 2002. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, 2002.

MORGAN, Ariadine. **Métodos mais utilizados na avaliação de impactos ambientais**. Disponível em: www.cpt.com.br/noticias/metodos-mais-utilizados-na-avalicao-de-impactos-ambientais > acesso em 29 maio 2023.

MOREIRA, Fatima Maria de Souza; SIQUEIRA, J.O.S. **Microbiologia e Bioquímica do solo**. Lavras: UFLA, 2006. 729 p.

MOTTA, Ivo de Sá;TAFFAREL, João Carlos. **Calda bordalesa- utilidades e preparo**. **Embrapa,2008**. Disponível em <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/38833/1/FOL200837.pdf> - acesso em 1 de jul de 2023

MULLIGAN, Catherine.; YOUNG, Raymond .; GIBBS, Bernard. An evaluation of technologies for the heavy metal remediation of dredged sediments. **Journal of Hazardous Materials**, v. 85, p. 145–163, 2001.

NACHIGALL, Gilmar.Ribero; NOGUEIRO, Roberta Correa;ALLEONI, Luis Reynaldo . et al. Formas de cobre em solos de vinhedos em função do pH e da

adição de cama-de-Frango. **Pesquisa Agropecuária Brasileira.**, 42, p. 427,343, 2007.

NASCIMENTO, C. W. A. do et al. Fitoextração de metais pesados em solos contaminados: avanços e perspectivas. **Tópicos em Ciência do Solo**, 2009.

PARK, Jinn. Hee; LAMB, Dane; PERIYASSAMI, Paneerselvam; GIRISH, Chopalla; BOLAN, Nauthi; CHUNG, Jae-Woo Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal (loid) contaminated soils. **Journal of Hazardous Materials**, v. 185, p. 549–574, 2011.

PASCALICCHIO, Áurea. **Contaminação por metais pesados**. São Paulo: Annablume, 132 p., 2002.

PIRES, Fabio Ribeiro;. **Fitorremediação de solos contaminados com herbicidas**. Tese de Doutorado, UFV, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pd/a/D8whJrnpZkZp3pSY3zML8PS/?format=pdf&lang=pt>, acesso em 23 maio 2023.

RIGO, M. M.; RAMOS, R. R.; CERQUEIRA, A. A.; SOUZA, P. S. A.; MARQUES, M. R. C. **Regulamentação do subproduto derivado do tratamento de águas residuárias domésticas e seu reúso na agricultura**. **Gaia Scientia**, [S. l.], v. 8, n. 1, 2014. Disponível em: <https://periodicos.ufpb.br/ojs/index.php/gaia/article/view/17550>. Acesso em: 1 jul. 2023.

ROCHA, Julio Cezar; ROSA, André Henrique; CARDOSO, Arnaldo Alves. **Introdução à Química Ambiental**. 2. ed.: Porto Alegre: Bookman, 256 p., 2009.

RUHLING, Ake; SODERSTROM, Bengt. Changes in fruitbody production of mycorrhizal and litter decomposing macromycetes in heavy metal polluted coniferous forest in North Sweden. *Water Air Pollution*, Saint Paul, v. 49, p 375-387, 1990.

SANTOS, H. P. et al. **Comportamento fisiológico de plantas de aveia (*Avena strigosa*) em solos com excesso de cobre**. Bento Gonçalves; Embrapa, 2004 (Comunicado Técnico 49).

SANTIBÁÑEZ, Claudia; VERDUGO, Cesar; GINOCCHIO, Rosanna. Phytostabilization of copper mine tailings with bisolids: Implication for metal uptake and productivity of *Lolium perenne*. **Science of the Environment**, 395:1-10, 2008

SCHENBERG, Ana Clara Guerrini. Biotecnologia e desenvolvimento sustentável. Estudos Avançados, v. 24, n. 70, 2010.

Disponível em <https://www.revistas.usp.br/eav/article/view/10488/12230>, acesso em 23 maio 2023.

SMITH, Sally.; REAO, Dadid. **Mycorrhizal symbiosis**. 3 ed., San Diego, Academic Press, 2008, 787 p.

LOPES, Alfredo Scheid.; VASCONCELLOS, Carlos Alberto .; NOVAIS, Roberto Ferreira. Adubação fosfatada em algumas culturas nos Estados de Minas Gerais, Espírito Santo e Rio Janeiro. In: OLIVEIRA, A.J. de; LOURENÇO, S.; GOEDERT, W.J. **Adubação fosfatada no Brasil**. Brasília, EMBRAPA-DID, 1982. p.137-200, (EMBRAPADID. Documentos, 21).

LLOYD, Jonh, ANDERSON, Robert T, MACASKIE, Lynne E. Bioremediation of metals and radionuclides. In: **Bioremediation: Applied microbial solutions for real world environmental cleanup**. Atlas, R.M and Philp, J.C (eds). ASM Press, ISBN 1-55581- 239-2, Washington, D.C. 294 p., 2005.

VOLKWEISS, S.J.; RAIJ, B. van. Retenção e disponibilidade de fósforo em solos. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO: BASES PARA A UTILIZAÇÃO AGROPECUÁRIA, 4., 1976, Brasília, São Paulo, EDUSP; Belo Horizonte, Ed. Itatiaia, 1977. p.317-32.

WU, Gang; KANG, Ubiau; ZHANG, Xiaoyang; SHOO, Hangbo. A critical review on the bio-removal of hazardous heavy metals from contaminated soils: Issues, progress, eco-environmental concerns and opportunities. **Journal of Hazardous Materials**, v. 174, p. 1–8, 2010.

YOUNG, Raymond ; MOHAMMED, A. M. O.; WARKENTIN, Brenno. Principles of contaminant transport in soils. Amsterdam: Elsevier, Netherlands. **Development in Geotechnical Engineering**, v. 73, 327 p., 1992.