



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA



FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

ERLANDO NELSON DOS SANTOS SOARES

REMEDIÇÃO E BIORREMEDIÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS

Uberlândia, MG

2020

ERLANDO NELSON DOS SANTOS SOARES

REMEDIAÇÃO E BIORREMEDIAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Vicelma Luiz Cardoso

Uberlândia, MG

2020

ERLANDO NELSON DOS SANTOS SOARES

REMEDIÇÃO E BIORREMEDIÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Vicelma Luiz Cardoso

Uberlândia, MG, __ de _____ de 2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dra. Vicelma Luiz Cardoso
Universidade Federal de Uberlândia

Me. Amanda Carmelo da Rocha
Universidade Federal de Uberlândia

Dra. Camila Stéfanne Dias Costa
Universidade Federal de Uberlândia

Prof^ª. Dra. Miria Hespanhol Miranda Reis
Universidade Federal de Uberlândia

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo estímulo, carinho e compreensão e aos meus irmãos e amigos que me acompanharam durante toda a realização dessa graduação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha mãe, Helena, e ao meu pai, Erlando, que em toda sua simplicidade e dificuldades, me ajudaram na realização deste objetivo acadêmico.

Aos meus amigos e irmãos, por todo apoio, amor e compreensão.

Agradeço à professora Vicelma Luiz Cardoso o incentivo, motivação e orientação nesta caminhada acadêmica.

Agradeço, por fim, a todos que fizeram parte desta jornada, mesmo que indiretamente, proporcionando ajuda e incentivo na realização dessa formação.

RESUMO

Os crescentes avanços tecnológicos, bem como as transformações nos processos produtivos, têm exigido mudanças no mercado e na indústria, que acabam pondo em risco a qualidade do meio ambiente, fundamentalmente das águas, tanto superficiais quanto subterrâneas, dos solos e do ar, daí a necessidade de criar estratégias para a gestão de resíduos, tais como infraestruturas apropriadas e ações de recuperação e remediação das áreas afetadas pelos acidentes industriais, dentre as que destacam as técnicas biológicas para remediação de solos contaminados, objeto da presente pesquisa. Este trabalho de pesquisa visa identificar na literatura científica, por meio de uma pesquisa de natureza descritiva e de uma metodologia de revisão bibliográfica sistematizada, a importância do uso de técnicas de biorremediação de solos contaminados, utilizadas fundamentalmente para enfrentar a contaminação por metais pesados, usando micro-organismos removedores. Dentre os resultados da pesquisa destaca o fato de que as técnicas de remediação biológica do solo contaminado são promissórias, pois diminuem o impacto dos processos de remediação de solos para o meio ambiente, exigem menor tempo para alcançar os resultados esperados e ainda representam menores custos, tanto na projeção quanto na implementação dos processos de remediação.

Palavras-chave: Remediação Ambiental. Biorremediação. Solos Contaminados.

ABSTRACT

Increasing technological advances, as well as changes in production processes, have required changes in the market and industry, which endanger the quality of the environment, especially surface and groundwater, soil and air, hence the need to create strategies for waste management, such as appropriate infrastructures and recovery and remediation actions of areas affected by industrial accidents, among which highlight the biological techniques for remediation of contaminated soils, object of this research, oriented to identify in the literature scientific, through a descriptive research and a systematic literature review methodology, the importance of using bioremediation techniques of contaminated soils, used primarily to address contamination by heavy metals, using removing micro-organisms. Among the results of the research highlights the fact that the techniques of biological remediation of contaminated soil are promising because they reduce the impact of soil remediation processes on the environment, require less time to achieve the expected results and still represent lower costs, both in the projection and implementation of remediation processes.

Keywords: Environmental Remediation. Bioremediation. Contaminated Soils.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
MPE	Extração Multifásica
POA	Processos Oxidativos Avançados
SVE	Ventilação do Solo
UFU	Universidade Federal de Uberlândia

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	REMEDIAÇÃO DE SOLOS	15
	2.1 Contexto Ambiental.....	15
	2.2 O Solo	17
	2.3 Remediação de Solos.....	18
3	TÉCNICAS DE REMEDIAÇÃO DE SOLOS.....	22
	3.1 Processos Físico-Químicos	25
	3.1.1 Ventilação do Solo.....	25
	3.1.2 Lavagem do Solo	26
	3.1.3 Oxidação Química	27
	3.1.4 Processos de Solidificação e Estabilização.....	28
	3.2 Processos Térmicos	28
	3.3 Processos Especiais	29
	3.4 Processos de Biorremediação.....	31
4	BIORREMEDIAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS	33
	4.1 A Biorremediação	33
	4.2 Tecnologias de Biorremediação de Solos	34
	4.2.1 O <i>Landfarming</i>	34
	4.2.2 A Atenuação Natural Monitorizada.....	35
	4.2.3 A Bioventilação	36
	4.2.4 A Fitorremediação	37
	4.2.5 As Eiras Biológicas.....	39
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
	REFERÊNCIAS.....	42

1 INTRODUÇÃO

Os crescentes avanços tecnológicos, bem como as transformações nos processos produtivos, têm exigido mudanças no mercado e na indústria, que acabam pondo em risco a qualidade do meio ambiente, fundamentalmente das águas, tanto superficiais quanto subterrâneas, dos solos e do ar, daí a necessidade de criar estratégias para a gestão de resíduos, tais como infraestruturas apropriadas e ações de recuperação e remediação das áreas afetadas pelos acidentes industriais.

A maior parte destes acidentes está relacionada com os metais pesados, com o uso indiscriminado de pesticidas na agricultura e com a indústria do petróleo, considerada uma das principais indústrias responsáveis pelos impactos negativos na qualidade do subsolo e das águas subterrâneas. Geralmente os derrames ocorrem devido a vazamentos durante todas as fases do processo produtivo de seus derivados, principalmente durante as últimas duas fases, a saber: sua distribuição e consumo (FERNANDES; CHIAVONE FILHO, 2014).

A recuperação das áreas impactadas pelos processos e acidentes industriais é considerada uma prioridade atualmente, e isso tem exigido a criação de técnicas e estratégias que venham minimizar os riscos ambientais de forma efetiva e duradoura (MAGALHÃES; SOBRINHO; MAZUR, 2011).

A escolha das técnicas de recuperação e remediação das áreas afetadas, que podem ser desenvolvidas fora ou dentro do local da contaminação (conhecidas como técnicas *ex situ*, com remoção de solo, e técnicas *in situ*, sem remoção de solo), aproveitando diversos processos, tanto físicos, quanto químicos e/ou biológicos, depende dos problemas causados pelos acidentes industriais e seus resultados dependem de diversas questões, tais como o tipo de solo; as interações entre os reagentes utilizados; a natureza dos contaminantes (FERNANDES; CHIAVONE FILHO, 2014); a concentração dos contaminantes; o nível de umidade, a temperatura, o pH, a salinidade e a matéria orgânica presente no solo (RUIZ, *et al.*, 2012).

Considerando os acidentes ambientais recentes, torna-se indispensável reconhecer a inexistência de tecnologia suficiente para “limpar” os rios e cidades afetadas pelos desastres, sendo necessário discorrer sobre as técnicas de remediação ambientais mais utilizadas na

atualidade, principalmente aquelas que envolvem processos biotecnológicos, devido a suas vantagens e ao fato de que, no Brasil, esses projetos estejam ainda no campo da teoria, mesmo existindo uma grande probabilidade de expansão de seu uso prático (RIBEIRO; CUNHA; SILVA, 2015), situação que justifica a escolha desta temática para o desenvolvimento do presente trabalho de pesquisa.

Nesse contexto, a pesquisa a seguir visa identificar na literatura científica a importância do uso de técnicas de biorremediação de solos contaminados, utilizadas fundamentalmente para enfrentar a contaminação por metais pesados, usando microorganismos removedores.

A pesquisa ora tratada é de natureza descritiva, realizada por meio de uma revisão bibliográfica sistematizada, baseada em obras secundárias que abordam o tema em questão, publicadas no período de dezembro de 2009 a novembro de 2019, isto é, nos últimos dez anos. A coleta do material para a pesquisa foi realizada no período de outubro a novembro de 2019.

Para a Revisão de Literatura se efetivou uma consulta em livros, dissertações, teses, trabalhos apresentados em eventos acadêmicos e científicos e, principalmente, artigos científicos, selecionados através de busca em livros, sites de revistas e jornais acadêmicos, catálogos de dissertações e teses das áreas relacionadas com a temática (principalmente Engenharia e Química), para o referencial teórico em torno às técnicas de remediação e biorremediação de solos contaminados.

O levantamento de dados para a pesquisa foi realizado em ambiente virtual, principalmente no *Google Scholar*, na fonte de informação SciELO (*Scientific Electronic Library Online*) e no Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES. Alguns descritores utilizados na busca livre foram: “Remediação Ambiental”, “Biorremediação”, e “Solos Contaminados”; estes termos foram utilizados de forma conjunta e isolados.

O trabalho de pesquisa está estruturado em cinco capítulos de caráter teórico, que abordam questões relacionadas com o tema da pesquisa, a saber:

- o primeiro capítulo, de caráter introdutório, apresenta um panorama geral da pesquisa, considerando seus objetivos, justificativa, procedimentos metodológicos e estrutura;
- o segundo capítulo apresenta uma aproximação à remediação ambiental, principalmente no que se refere a seu histórico e importância social, bem como ao contexto ambiental e ao conceito de remediação ambiental propriamente dito;
- o terceiro capítulo aborda a remediação de solos, considerando as técnicas de remediação mais utilizadas na atualidade;
- o quarto capítulo refere-se especificamente à biorremediação de solos, com foco nas diversas tecnologias de biorremediação de solos contaminados, suas vantagens e desvantagens;
- finalmente, o quinto capítulo, de caráter conclusivo, elenca algumas considerações finais da pesquisa.

2 REMEDIAÇÃO DE SOLOS

Este capítulo aborda a remediação ambiental, entendida como um processo de descontaminação do meio ambiente por meio de processos físicos, químicos e/ou biológicos, que visam o melhoramento da qualidade ambiental, através da eliminação de agentes contaminantes resultantes dos impactos causados por acidentes industriais; para tanto, apresenta-se um breve panorama do contexto ambiental atual, que considera fundamentalmente os resultados da contaminação causada por esses acidentes, bem como uma aproximação às características do solo e em torno à definição dos conceitos de remediação ambiental e remediação de solos, no intuito de iniciar a discussão sobre as técnicas de remediação de solos contaminados mais utilizadas na atualidade.

2.1 Contexto Ambiental

A contaminação do meio ambiente tem se tornado um problema grave em nível global, devido ao uso de fertilizantes e pesticidas na agricultura, de radionuclídeos, de compostos orgânicos, de metais pesados, de derivados do petróleo e outros produtos químicos e industriais, bem como ao descarte inadequado dos resíduos sólidos, questão causada pelo uso indiscriminado desses produtos e por acidentes ambientais relacionados (ALVES *et al.*, 2016).

Em estudo sobre os processos de remediação de solos contaminados utilizando biotecnologia, Alves *et al.* (2016) apontaram que as principais fontes de contaminação dos solos decorrem de rejeitos industriais e urbanos, de produtos agroquímicos e do vazamento acidental (ou não) de compostos xenobióticos, que interferem nos processos do solo causando várias problemáticas ambientais, tais como a toxicidade às comunidades aquática e edáfica, a contaminação dos recursos hídricos, os problemas de produtividade e de saúde (humana e animal).

Conforme Kummer (2014) uma área pode ser considerada contaminada quando as concentrações dos elementos de interesse ambiental são superiores ao limite que determina o

risco potencial dessas substâncias, denominado valor de intervenção¹, o qual exige uma ação imediata na área, pois podem afetar a saúde dos seres vivos (humanos e animais) e, ao mesmo tempo, diversas questões relacionadas com os ecossistemas, principalmente a biodiversidade, a sustentabilidade e a produtividade.

Dentro desta mesma perspectiva, Lima (2017) sugere que a contaminação envolve, necessariamente, uma modificação nas características físico-químicas de um determinado local quando comparado a uma situação anterior, devido à infiltração, intencional ou não, de substâncias ou resíduos poluentes, acumulados nos sedimentos, no solo, nas rochas ou na água do local.

A indústria petroleira é uma das principais indústrias responsáveis pelos impactos negativos na qualidade do subsolo e das águas subterrâneas, que ocorrem devido a vazamentos durante todas as fases do processo produtivo de seus derivados, predominantemente durante as fases de distribuição e consumo (FERNANDES; CHIAVONE FILHO, 2014).

No caso da agricultura, o uso de pesticidas, e de outros compostos agroquímicos para o controle de pragas, acaba causando problemas inclusive à saúde humana, além de gerar toxicidade a organismos, tanto alvo quanto não alvo, e alterando a qualidade do meio ambiente, nomeadamente do ar, da água superficial e subterrânea, da fauna, da vegetação e do solo (ALVES *et al.*, 2016).

O caso dos metais pesados (essenciais e não essenciais), que compreendem quarenta elementos com uma densidade superior a 5 g/cm³, é ainda mais preocupante, pois se trata de poluentes resultantes de diversas atividades industriais² e que não podem ser degradados de forma biológica ou química, podendo ser acumulados no solo, ser absorvidos pelas plantas e, dessa forma, atingir a cadeia alimentar, tornando-se extremamente perigosos para os

¹ No Brasil, os valores de prevenção, avaliação e intervenção do solo, em zonas industriais, agrícolas e residenciais, foram determinados pela resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente CONAMA

² Dentre essas atividades podem ser destacadas a mineração, a produção de aparelhos eletrônicos, veículos e baterias automobilísticas, a incineração, a produção de pinturas, tubulações metálicas, munições e outros desperdícios industriais.

ecossistemas, tanto terrestres quanto aquáticos, principalmente no caso de interagir com alguns dos componentes do solo (KUMMER, 2014).

A busca pela eliminação dos riscos ambientais decorrentes dessas problemáticas industriais tem gerado a criação de diversas estratégias de remediação ambiental, que visam garantir o cuidado do meio ambiente e da saúde; nesse contexto, cabe definir a remediação ambiental e, mais especificamente, a remediação de solos, objeto da presente pesquisa, apresentada durante as próximas páginas.

2.2 O Solo

O solo é definido como um material terrestre que consiste na “parte desintegrada da camada superficial da crosta terrestre, constituída de material incoerente ou de fraca coerência”, devido a que nele existe uma mistura de diversos materiais, tais como: areia, argila, água, etc. (ALMEIDA, 2004, p. 10).

Por esse motivo, o solo é caracterizado como multifásico, pois sua estrutura envolve ao mesmo tempo minerais, materiais orgânicos, ar, água e micro-organismos; isso faz com que esteja repartido pelas fases sólida (constituída pela fração mineral e pela matéria orgânica e frequentemente encontrada em maior percentagem com o aumento da profundidade, devido à compactação do solo), gasosa (constituída por ar) e líquida (constituída por água) e com que seja facilmente influenciado, alterado e afetado por fatores físicos, químicos e biológicos (LIMA, 2017).

A importância do solo é que consiste numa matriz complexa e dinâmica que permite a ocorrência de diversos processos, influenciados por esses fatores, devido à composição do solo, nomeadamente a seu pH, à quantidade, modelo e tipo de distribuição, aos micro-organismos presentes, a sua umidade e temperatura, e à quantidade de matéria orgânica, considerada o constituinte principal do solo, por ser a responsável pela interação do solo com compostos orgânicos (ALMEIDA, 2004).

Dentre as funções socioeconômicas e ambientais que cumpre o solo, destaca o fato de que este atua como meio de produção de diversos alimentos e de tipo de biomassa, e como

meio de armazenamento, filtragem e transformação de substâncias, tais como o carbono e a água, daí sua importância para o meio ambiente e para a vida humana (ALBERGARIA, 2010).

Conforme Almeida (2004) a exploração e contaminação do solo, causada pela disposição inadequada dos resíduos industriais (acidental ou não) é um fator fundamental para sua degradação crescente, podendo ser pontual ou difusa, no primeiro caso, trata-se de uma contaminação causada pela concentração do contaminante em áreas pequenas, no segundo caso, trata-se de uma contaminação em menor concentração, mas em áreas mais extensas.

A contaminação de solo tem sido o principal motivo para o surgimento de processos, ações, tecnologias e técnicas voltadas à remediação e recuperação das áreas impactadas e, mais especificamente, à remediação de solos contaminados.

2.3 Remediação de Solos

A remediação ambiental consiste no uso de diversas técnicas de descontaminação para diminuir a concentração de agentes contaminantes no meio ambiente, tanto no solo, quanto na água e no ar, no intuito de verificar e garantir que sua qualidade seja adequada para os usos pretendidos e, ao mesmo tempo, que a saúde (humana e animal) seja protegida (ESTEVES, 2012).

Em vários países a proteção do solo é garantida pelas políticas públicas e legislações ambientais³ e em outros países, como no caso do Brasil, diversos esforços estão sendo orientados ao desenvolvimento de projetos orientados à avaliação da contaminação e à implementação de leis nesse sentido (ALMEIDA, 2004).

Segundo Kummer (2014) a ação remediadora visa a diminuição dos teores dos poluentes encontrados no meio ambiente até níveis que sejam seguros, para evitar os males que seu excesso possa ocasionar.

³ Estados Unidos, Canadá e alguns países europeus possuem legislações específicas para garantir o padrão de qualidade do solo e sua proteção, desde a década de 1980.

Nesse sentido, Lima (2017) sugere que o objetivo primordial da reabilitação de áreas contaminadas é a remoção ou neutralização dos contaminantes presentes no local, no intuito de possibilitar sua reutilização, garantindo o cumprimento da legislação relacionada com o meio ambiente e com a saúde humana.

O tratamento de solos contaminados por compostos orgânicos reúne várias técnicas e processos, tanto biológicos quanto geoquímicos, que interferem na transformação desses compostos no meio poroso. Esses procedimentos encontram-se em sua maioria em fase de testes, sendo que apenas algumas práticas são aplicadas em escala comercial (POLICARPO, 2008).

As técnicas de remediação de solos podem ser classificadas de acordo com três fatores relacionados, a saber: a transformação do contaminante (dependendo de sua natureza), o local do tratamento e o tipo de tratamento (POLICARPO, 2008).

De acordo com a transformação do contaminante, existem técnicas de destruição⁴, baseadas fundamentalmente no uso de métodos químicos e altas temperaturas (POLICARPO, 2008), e técnicas de separação⁵ (física, química e ou magnética), que visam à extração do contaminante para uma fase de gerenciamento mais concentrada, removendo a porção afetada, no intuito de reduzir o volume do material que deve ser remediado (SANTOS, 2009).

Conforme Kummer (2014), as técnicas de separação magnética visam a separação e concentração das partículas, de acordo com sua suscetibilidade magnética, por meio do uso de um gradiente de energia magnética; as técnicas de separação química envolvem reações de redução e/ou oxidação para eliminar o carácter perigoso dos contaminantes; e as técnicas de separação física utilizam diversas propriedades dos materiais para essa separação, tais como sua densidade, seu tamanho e viscosidade, etc. Essas técnicas de separação podem ser utilizadas em associação com outras técnicas, o que otimiza a descontaminação e remediação do meio ambiente.

⁴Como no caso da técnica de incineração, a técnica de redução química, a técnica de oxidação química, as técnicas de biorremediação, a fotólise, a vitrificação *in situ*, etc.

⁵ Tais como a dessorção térmica, a lavagem de solo, a extração por solvente e a extração com fluido supercrítico, etc.

Embora possuam algumas vantagens, as técnicas de separação física exigem o uso de equipamentos muito grandes e de pessoal especializado, além de gerar resíduos líquidos contaminados em grande quantidade (SANTOS, 2009).

Já as técnicas de decomposição (destruição) visam à mineralização dos contaminantes, para que sejam convertidos em água, gás carbônico ou íons inorgânicos. Neste caso, segundo Santos (2009), a principal desvantagem é que nem sempre o processo é completado e novos compostos de carácter intermediário podem se formar, gerando uma toxicidade até mesmo maior do que a original.

A esses dois tipos de técnicas, Santos (2009) acrescenta as tecnologias de imobilização do contaminante⁶, que são mais práticas e possuem menor custo, estando orientadas ao isolamento do contaminante por meio da criação de barreiras físicas, para minimizar (ou até mesmo evitar) sua migração e, conseqüentemente, reduzir seus impactos ao meio ambiente e à saúde humana.

De acordo com o local do tratamento, existem técnicas *ex situ* e *in situ*. As primeiras exigem a escavação do local e a remoção do solo contaminado antes de iniciar o tratamento, para que seja transferido a uma planta industrial onde é realizado o tratamento, e as segundas podem ser realizadas diretamente no local de tratamento, nas condições naturais do solo (KAUFMANN, 2015). Conforme Policarpo (2008) a escolha dessas técnicas depende da situação específica, podendo todas as técnicas ser usadas em qualquer uma dessas duas formas.

As técnicas *ex situ* e *in situ* possuem diversas vantagens e desvantagens, sendo que as principais vantagens dos tratamentos *ex situ* são o menor tempo de remediação (POLICARPO, 2008), os resultados mais uniformes no processo, devido à mistura e homogeneização, seja contínua ou periódica, do solo (KAUFMANN, 2015) e a maior facilidade de controle das condicionantes do meio, consideradas fundamentais dentro dos processos de tratamento dos solos (KUMMER, 2014).

⁶ As técnicas de imobilização ou isolamento são as mais frequentemente utilizadas, porque possuem procedimentos de baixo custo e práticos, embora não sejam ideais.

Já no caso dos tratamentos *in situ*, a vantagem está relacionada com a economia do processo, pois não há custos de remoção de solo contaminado e nem de transporte (POLICARPO, 2008), sendo que ainda gera menores impactos ambientais decorrentes do processo de remediação (KUMMER, 2014), pois o traslado do material contaminado até a planta industrial gera contaminação secundária (KAUFMANN, 2015).

A última classificação das técnicas de remediação de solos contaminados é de acordo ao tipo de tratamento, a saber: físico, químico, térmico, biológico ou especial, como apresentado durante o capítulo a seguir, que aborda as técnicas de remediação de solos, seu uso, características e vantagens.

3 TÉCNICAS DE REMEDIAÇÃO DE SOLOS

Existem na atualidade diversas técnicas de remediação de solos contaminados, algumas delas já dominadas e outras que se aproveitam de tecnologias emergentes; no Brasil, não existem ainda programas de remediação oficiais, e há apenas alguns programas pioneiros (ALMEIDA, 2004), por esse motivo, as empresas que atuam em processos de remediação ambiental utilizam predominantemente o primeiro tipo de tecnologias (dentre as que destacam a oxidação química *in situ*, a dessorção térmica, a incineração e o *pump and treat*) e, em alguns casos, contratam empresas especializadas em tecnologias emergentes, destacando o uso de processos biotecnológicos (RUIZ *et al.*, 2012).

A escolha de uma técnica ou estratégia específica para a remediação da área afetada, no intuito de garantir sua efetividade, depende de alguns fatores, inclusive os custos do processo, a concentração do poluente, as características do solo, isto é, depende fundamentalmente do problema a ser enfrentando em cada situação, pois, conforme Kummer (2014) existem diversas tecnologias, que possuem ao mesmo tempo vantagens e limitações, cuja eficácia é variável a depender das características do resíduo poluente e do meio envolvente.

É importante destacar ainda que a maior parte dos processos utiliza mais de uma tecnologia para garantir uma descontaminação efetiva (KUMMER, 2014), pois a diversidade de contaminantes existentes torna as ações de remediação de áreas contaminadas uma tarefa complexa; no entanto, a intervenção realizada com maior frequência envolve a remoção do solo contaminado e seu isolamento (RUIZ *et al.*, 2012).

Segundo Albergaria (2010) essas diversas tecnologias de remediação de solos contaminados podem ser aplicadas de forma separada, de forma conjunta, ou de forma consecutiva, dependendo das exigências da situação, isto é, dos objetivos e necessidades do processo.

Dentro dessa perspectiva, Baldissarelli *et al.* (2019) sugeriram que a combinação de dois ou mais métodos de remediação permite obter maior eficiência, por exemplo, no caso específico dos resíduos de tipo agrotóxico tem sido demonstrada a efetividade dos processos

eletrocinéticos acompanhados da lavagem do solo (e inclusive de outros métodos) para a degradação dos contaminantes.

Nesse sentido, Ruiz *et al.* (2012) sugerem que a seleção da(s) técnica(s) para a remediação do solo contaminado depende fundamentalmente de três fatores, a saber: o nível de remediação necessário para garantir a possibilidade de recuperar a área para usos futuros; a profundidade da contaminação, que inclusive pode afetar as águas subterrâneas; e os custos envolvidos no processo.

Nesse sentido, Kummer (2014) sugere que antes de iniciar o processo, deve haver um estudo criterioso que avalie as possibilidades e os riscos de cada uma das metodologias disponíveis, pois os resultados de cada técnica dependem de determinados fatores, dentre os que destacam: as condições do local contaminado; a concentração do contaminante e o tempo necessário para remover ou degradar o contaminante, considerando que este último fator interfere diretamente no custo do processo.

A Tabela 1, a seguir, apresenta de forma sucinta a classificação das técnicas de remediação de solos de acordo com a ação, sendo possível identificar quatro tipos de técnicas: as técnicas biológicas, as técnicas físico-químicas, as especiais e as térmicas. Cada uma das técnicas está relacionada com as tecnologias envolvidas dentre esses processos.

Tabela 1 – Classificação das técnicas de remediação de acordo com a ação da remediação

Classificação das técnicas de descontaminação de Solos	Princípio de funcionamento	Tecnologias desenvolvidas	Custo estimado (US/ton)	Contaminantes removidos
Biológicas	Utilização de Micro-organismos para a remoção dos contaminantes	Técnica agrária (<i>Landfarming</i>)	10-90	Compostos orgânicos, Hidrocarbonetos, PAH's, pesticidas, metais como Ni e Zn.
		Eiras biológicas (<i>Biopiles</i>)	15-35	
		Bio-ventilação	15-75	
		Atenuação natural ou Bioreabilitação	-	
		Fitorremediação	-	
		Compostagem	-	
Físico-químicas	Envolvem reações químicas e processos de transferência	Ventilação do Solo (SVE) ou extração de vapor	75	Compostos Orgânicos Voláteis (COVs), Compostos Orgânicos Semi-Voláteis
		Lavagem de Solo (<i>Soil Flushing</i>)	25-150	

	de massa, como sorção etroca iônica	Decloração ou desalogenação	175-450	(COSVs), compostos inorgânicos, bifenis policlorados, dioxinas, furanos e metais - escala.
		Extração química/Extração por Solventes	500-600	
		Solidificação/Estabilização	-	
Térmicas	Aquecimento do contaminante, induzindo sua volatilização e remoção ou a fundição e solidificação da massa de solo contaminado	Dessorção Térmica	25-225	COVs, COSVs, compostos orgânicos halogenados e não halogenados, pesticidas, PCBs, dioxinas e furanos.
		Incineração	50-1200	
		Vitrificação	-	
		Pirólise	-	
		Descontaminação com gás quente	-	
		Tratamento térmico	-	
Especiais		Técnica eletrocinética	26-296	Metais pesados e compostos orgânicos polares
		Técnica do plasma	-	

Fonte: Adaptado de Kaufmann (2015).

Na Tabela 1 é possível identificar ainda quatro questões fundamentais que diferenciam essas técnicas, a saber: os princípios de funcionamento de cada um dos tipos de técnicas, sendo definidos pelo tipo de processo utilizado para a remoção dos contaminantes (e inclusive pelo tipo de agente descontaminante); as tecnologias desenvolvidas dentro dessas técnicas; o custo estimado em dólares por tonelada (em alguns casos) e os contaminantes que são passíveis de redução por meio das técnicas.

Observa-se que, no caso das técnicas biológicas, os custos estimados são inferiores, se comparados a outros processos, sendo o contrário para algumas técnicas físico-químicas, térmicas e especiais, fundamentalmente no caso das técnicas de extração química/extração por solventes, de incineração, de decloração e de eletrocinética.

Esses apontamentos condizem com o estudo de Almeida (2004) quem identificou durante sua pesquisa que os tratamentos maiormente utilizados atualmente são muito caros (custo de entre 120 e 500 dólares por tonelada de solo) e, geralmente, não atingem os níveis de qualidade exigidos pela legislação.

Durante as próximas páginas serão abordados esses tipos de técnicas, acima elencados, de forma mais aprofundada, considerando fundamentalmente suas características, formas de

funcionamento, as tecnologias envolvidas nos processos de cada tipo e suas vantagens e limitações.

3.1 Processos Físico-Químicos

As tecnologias físico-químicas de remediação de solos utilizam as propriedades físicas e químicas dos agentes contaminantes, ou até mesmo do solo, para a remoção, imobilização e/ou destruição desses contaminantes.

Diversos processos físico-químicos utilizados para a descontaminação/remediação de solos são abordados na literatura científica, dentre essas técnicas destacam a Ventilação do Solo (*Soil Venting*– SVE), a Lavagem do Solo (*Soil Flushing*), a extração multifásica, a decloração ou desalogenação, a extração química ou extração por solventes, a solidificação/estabilização, a oxidação química e os processos oxidativos avançados (POA); esses processos serão aprofundados a seguir, destacando suas características principais, vantagens e limitações.

3.1.1 Ventilação do Solo

A Ventilação do Solo (*Soil Venting*– SVE), também conhecida como Extração de Vapor (*Vacuum Extraction*), consiste na instalação de poços, tanto verticais quanto horizontais, na área contaminada, para a aplicação de vácuo à matriz do solo. Esse processo gera uma pressão negativa que permite um movimento de ar dentro dos poços e, conseqüentemente, a volatilização e remoção dos compostos orgânicos, voláteis e alguns semivoláteis (ESTEVES, 2012).

Khan, Husain e Hejazi (2004) apontaram que, para auxiliar ao vácuo, podem ser instalados sopradores de ar que irão contribuir com a vaporização do contaminante; nesse caso, a extração dos vapores orgânicos é complementada com seu tratamento e liberação para a atmosfera.

Dentre as formas de tratamento destacam três tipos, a saber: os sistemas de extração (bombas de vácuo, poços de extração, poços de injeção de ar, poços para monitorização, capa

impermeabilizante e separadores de vapor/líquido), os sistemas de tratamento do gás e os sistemas de tratamento do líquido (ALBERGARIA, 2010).

Albergaria (2010) ainda apresenta as vantagens e desvantagens do tratamento de extração de vapor, no primeiro caso devem ser destacadas as vantagens de instalação, a performance efetiva da tecnologia, os tempos de tratamento e a facilidade para combinar esta com outras técnicas; a essas vantagens Esteves (2012) acrescenta a biodegradação dos compostos pela microfauna que a técnica permite, pois isso gera um efeito positivo adicional para a remediação da área. Já as desvantagens estão relacionadas especificamente com o local de aplicação, com o tratamento dos gases extraídos e com a eficiência não comprovada da técnica em alguns tipos de solos (ALBERGARIA, 2010).

Cabe destacar ainda que existe uma técnica relacionada com a SVE, conhecida como técnica de Extração Multifásica (MPE), que conforme Esteves (2012) consiste na extração das fases vapor, tanto dissolvida quanto livre, de forma simultânea, para a remediação em zonas saturadas e vadosas, sendo principalmente utilizado na remediação de águas subterrâneas (KHAN; HUSAIN; HEJAZI, 2004).

3.1.2 Lavagem do Solo

A lavagem do solo, também conhecida como *Soil Flushing*, consiste no uso de um solvente específico para a lavagem do solo, a depender do contaminante que deva ser removido (ALMEIDA, 2004); este processo de separação está fundamentado no princípio de transferência, que visa à captação de um contaminante do solo para um solvente, conhecido como sequestrador, para arrastar o contaminante até o lençol freático e bombear água subterrânea para seu tratamento.

Conforme Kummer (2014) esta técnica pode ser aplicada *in situ* ou em reatores, sendo mais utilizada a segunda forma, pois a técnica *in situ* exige o estabelecimento de condições de operação seguras, que são difíceis de conseguir, e devido a que seus resultados dependem do contato entre o solvente e o contaminante e, ao mesmo tempo, da solubilidade deste último.

Dentre as vantagens do uso desta técnica, Kummer (2014) destaca a promoção da mobilidade de metais pesados e sua migração por meio de técnicas de dessorção ou solubilização para a fase líquida, a possibilidade de recuperar os metais após o tratamento, a obtenção de resultados de forma mais rápida que com o uso de outras técnicas, e o fato de se tratar de uma tecnologia de solução permanente, que proporciona a reutilização do solo no futuro.

Já as desvantagens do processo são, conforme apontado por Almeida (2004): a exigência de equipamentos muito grandes e, conseqüentemente, de profissionais qualificados no uso desses equipamentos e, ao mesmo tempo, a grande quantidade de líquidos contaminados que devem ser transportados para tratamento, que aumentam o custo do processo e podem gerar outras problemáticas.

3.1.3 Oxidação Química

A oxidação química baseia-se na aplicação de agentes oxidantes, tais como o ozônio, o permanganato de potássio, o peróxido de hidrogênio, o reagente de Fenton, etc., para a degradação de compostos orgânicos; a escolha de um desses agentes para a aplicação depende do meio que será tratado e do agente a ser degradado (POLICARPO, 2008).

Esta técnica tem se mostrado uma das mais promissoras para a remediação dos solos, principalmente quando aplicada *in situ* (POLICARPO, 2008), pois é efetiva no tratamento de diversos resíduos perigosos, presentes tanto nas águas subterrâneas, quanto em sedimentos e solos (RUIZ *et al.*, 2012).

Dentre as vantagens da utilização da técnica de oxidação química destacam o fato de que os oxidantes são facilmente obtidos e que o tempo do processo de tratamento é de apenas alguns meses, o que torna o processo economicamente viável. Da mesma forma, esta tecnologia pode ser combinada com outras técnicas (como a biorremediação e a incineração) para incrementar seus resultados positivos, atingindo inclusive os compostos orgânicos recalcitrantes (RUIZ *et al.*, 2012).

Já as desvantagens mais frequentemente elencadas são: a reatividade entre o agente oxidante e o contaminante, a transferência de massa que ocorre entre as fases adsorvida e aquosa, a exigência de estudos de viabilidade prévios (POLICARPO, 2008) e os custos de transporte, principalmente no caso de usar a técnica em combinação com outra (RUIZ *et al.*, 2012).

Dentro destes processos físico-químicos destacam os Processos Oxidativos Avançados (POA), considerados os mais eficazes para a destruição de poluentes de tipo orgânico, devido a que geram radicais hidroxila, que possuem um alto potencial de oxidação, liberando o contaminante para a fase aquosa, para que este possa ser oxidado pelos radicais (POLICARPO, 2008).

3.1.4 Processos de Solidificação e Estabilização

A solidificação e estabilização envolvem um grupo de métodos de remediação que visa à prevenção ou diminuição dos elementos tóxicos liberados no solo e causantes de contaminação; a solidificação, por exemplo, consiste na encapsulação do contaminante em uma matriz sólida, principalmente em monômeros líquidos, e é frequentemente aplicada *ex situ*, o que exige investimentos econômicos superiores. Já a estabilização visa à indução de reações químicas no intuito de garantir, ao mesmo tempo, a baixa mobilidade e a baixa toxicidade do contaminante (KUMMER, 2014).

Um dos processos de solidificação/estabilização mais frequentemente empregados na atualidade é a vitrificação, entendido como um processo que se aproveita da inserção de eletrodos na área contaminada e, ao mesmo tempo, da energia térmica para permitir a fusão e encapsulamento do material sólido contaminado em compostos silicatados modificados. Sua principal desvantagem é o alto custo do processo, porém, é frequentemente utilizado devido a sua aplicabilidade em solos contaminados por vários poluentes (KUMMER, 2014).

3.2 Processos Térmicos

Apenas três processos térmicos são abordados de forma aprofundada na literatura científica, cabendo destacar suas possibilidades e limitações, o primeiro processo é a Incineração, um tratamento utilizado para destruir os resíduos, inclusive domésticos e agrícolas.

Dentre as desvantagens do processo de incineração, Almeida (2004) destaca a formação de subprodutos indesejáveis durante os processos de combustão, questão que exige um cuidadoso controle do processo, que o torna mais caro.

O segundo processo é conhecido como Dessorção Térmica, cuja técnica mais utilizada é a injeção de vapor d'água no solo por meio de tubulações, dessa forma, o vapor acaba extraíndo do solo os contaminantes e permitindo que estes sejam absorvidos por pontos de vácuo e, posteriormente, direcionados a filtros ou condensadores para a recepção e tratamento da área (POLICARPO, 2008).

Conforme Almeida (2004), durante este processo de separação, a injeção de vapor d'água no solo permite que sejam instaladas tubulações na área contaminada, por meio das quais se injeta o vapor e outras tubulações de sucção, cuja finalidade é arrastar os contaminantes, retirá-los do solo e enviá-los a filtros ou condensadores para seu posterior tratamento.

Finalmente, a extração com fluido supercrítico é realizada com a passagem de um gás a elevadas pressão e temperatura (geralmente CO₂, devido a sua toxicidade baixa e a sua aceitabilidade ambiental), através do solo a ser remediado, para que arraste os contaminantes e seja, posteriormente, recolhido como o vapor d'água (SANTOS, 2009).

Dentre as desvantagens do método, Almeida (2004) sugere os custos dos equipamentos, demasiado elevados quando comparados com os equipamentos necessários para aplicação de outras técnicas, e a demanda energética, isso no caso de tratamentos em maior escala.

3.3 Processos Especiais

Os processos especiais são denominados desta forma, pois envolvem alternativas mais modernas, que não se encaixam nos grupos antes mencionados; neste caso, cabe destacar uma técnica que é frequentemente ressaltada na literatura científica como promissora para remediar as áreas contaminadas por resíduos perigosos, denominada como tratamento eletrocinético.

A eletrocinética é uma tecnologia geralmente utilizada para a remediação e descontaminação de solos de baixa permeabilidade, de sedimentos marinhos ou de lamas, que foram contaminados por metais pesados ou até mesmo por compostos orgânicos polares (LIMA, 2017), baseia-se na passagem de correntes elétricas de baixa intensidade, entre eletrodos dispostos no solo contaminado (um ânodo e um cátodo), que permitem a mobilização dos contaminantes metálicos, atraídos pelos eletrodos em forma iônica (KUMMER, 2014).

Para que a técnica eletrocinética possa ser aplicada alguns fatores devem ser verificados, o primeiro fator é que os íons precisam estar em solução aquosa para que ocorra a mobilização, o segundo fator é a necessidade de utilizar soluções para que o pH seja mantido no poço onde foram dispostos os eletrodos, evitando a precipitação e outros prejuízos para o sistema (HASHIM *et al.*, 2011).

Ainda conforme Lima (2017) os processos que envolvem a tecnologia eletrocinética e, fundamentalmente o fluxo dos contaminantes do solo, são influenciados por fatores como a mineralogia, a condutividade elétrica, a quantidade de água e o conteúdo em matéria orgânica do solo e a concentração do contaminante, a esses fatores Kaufmann (2015) acrescenta a profundidade a que se encontra o agente contaminante e o tempo de remoção do contaminante.

Ainda segundo Lima (2017) a mobilização das partículas carregadas é possibilitada pela água existente entre os poros do solo, por meio de diversos mecanismos de remoção, a saber:

- a eletromigração, entendido como o processo de eletrorreabilitação mais importante, consiste na deslocação dos íons do solo para o eletrodo de carga oposta, e depende do

tipo de solo (sua condutividade, porosidade, tortuosidade e carga de partículas), da mobilidade iônica para garantir a interatividade com os contaminantes;

- a eletro-osmose, que consiste no fenômeno de fluxo hidráulico onde as partículas negativas do solo geram uma dupla camada de água para permitir o transporte dos contaminantes em direção ao cátodo ou a outro meio absorvente encontrado durante sua trajetória; este fenômeno depende da quantidade de água no solo, da carga dos íons e do tipo de solo;

- a eletroforese, consiste no transporte das partículas por meio de um movimento similar ao dos íons, este mecanismo é mais significativo quando surfactantes são adicionados nos eletrólitos;

- a difusão, consiste no movimento de íons e moléculas deslocados da área contaminada para áreas de baixa concentração de contaminantes, e

- a eletrólise, um fenômeno que ocorre com a introdução de eletrodos em uma solução aquosa, onde a aplicação da corrente elétrica permite que ocorram reações de oxidação no ânodo para garantir a diminuição do pH e reações de redução no cátodo para tornar a solução alcalina.

Dentre as vantagens da aplicação da técnica eletrocinética, Kaufmann (2015) destaca a possibilidade de tratar o solo *in situ*, a economia que isso representa (quando comparada com outras técnicas tradicionais) e sua eficiência em solos de baixa permeabilidade, em solos homogêneos e com alta concentração do contaminante.

3.4 Processos de Biorremediação

Os processos biológicos para remediação dos solos contaminados são conhecidos também como tratamentos de biorremediação, que consistem na destruição e/ou transformação dos contaminantes por meio de organismos vivos, principalmente de micro-organismos bactérias e fungos (SILVA, 2008).

Trata-se de um processo destrutivo que pode ocorrer por meio da mineralização ou biotransformação dos poluentes ambientais em subprodutos menos tóxicos que os iniciais; segundo Almeida (2004) este processo é de grande interesse para a remediação de efluentes e áreas industriais, exigindo apenas que os micro-organismos sejam induzidos a atividade, para reduzir os tempos do processo, que podem ser exagerados para a descontaminação total da área ambiental em condições naturais.

Esses processos de biorremediação, objeto da presente pesquisa, são abordados durante o próximo capítulo, no intuito de verificar os principais tipos de técnicas de biorremediação utilizados na atualidade, suas características e fatores que influenciam a eficiência desses processos e, finalmente, suas vantagens e limitações na remediação de solos contaminados.

4 BIORREMEDIAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS

Diversas estratégias e técnicas de biorremediação de solos estão sendo utilizadas na atualidade, principalmente em países europeus, nos Estados Unidos e no Canadá, como uma opção efetiva para a reabilitação de áreas contaminadas; o interesse nestas técnicas decorre da comprovação de sua eficiência na degradação de compostos poluentes (RIBEIRO; CUNHA; SILVA, 2015).

Este capítulo aborda o conceito de biorremediação, o uso de plantas como ferramentas para a remediação ambiental e, fundamentalmente, para a remediação de solos contaminados, as principais tecnologias de biorremediação utilizadas na atualidade, suas vantagens e desvantagens, no intuito de verificar os avanços em sentido de descontaminação de áreas ambientais, com o aproveitamento de processos biológicos.

4.1 A Biorremediação

Os processos de biorremediação são considerados como técnicas de decomposição frequentemente utilizadas *in situ* (SANTOS, 2009), estes processos são de fácil aplicação e baixo custo, pois se aproveitam da ação de diversos micro-organismos para a redução da contaminação (ALMEIDA, 2004), sendo seu objetivo fundamental criar as condições necessárias para garantir a degradação e transformação dos contaminantes/poluentes, principalmente em dióxido de carbono e água, mas também sendo possível sua transformação em outras substâncias não tóxicas (SILVA, 2008).

Ainda segundo Silva (2008) a biorremediação é utilizada frequentemente como um passo secundário, após a aplicação de outras técnicas de remediação convencionais, no entanto, a cada vez mais é utilizada como abordagem primária, principalmente em caso de zonas mais sensíveis.

A eficiência dos processos de remediação biológica depende de fatores como o pH (que deve ficar em torno de 6,5 e 7,5), a temperatura (entre 15 e 40°C) e umidade da área

ambiental⁷, a biodisponibilidade do composto, o teor da matéria orgânica no solo, as enzimas segregadas pelo micro-organismo utilizado para a descontaminação e o potencial hidrogeniônico (ALVES *et al.*, 2016).

Considerando que a biorremediação é utilizada como uma alternativa, relativamente nova, para a descontaminação dos solos, por meio da redução dos efeitos poluentes com o uso de micro-organismos, durante as próximas páginas abordar-se-ão as diversas tecnologias que têm sido aplicadas nesse sentido.

4.2 Tecnologias de Biorremediação de Solos

Dentre os processos de remediação de solo mais utilizados, o primeiro mais viável economicamente é a biorremediação, seguido da técnica de lavagem do solo (SANCHES, 2009), daí o interesse de discorrer sobre essas tecnologias; no caso da biorremediação, cinco tecnologias são fundamentais para a descontaminação do solo na atualidade, a saber: o *landfarming*, a bioventilação, as eiras biológicas, a fitorremediação e a atenuação natural monitorizada (SILVA, 2008), essas tecnologias são apresentadas a seguir.

4.2.1 O *Landfarming*

O *Landfarming* é um processo orientado à redução dos poluentes a frações de solo superficiais, através de técnicas de remediação biológica. Dentro do processo devem ser dispostos dois elementos fundamentais para garantir sua efetividade: uma tela impermeabilizada e um sistema de drenagem e recolha de lixiviados, esses dois elementos preveem a transferência da contaminação para outras áreas ambientais (SILVA, 2008).

Conforme Ruiz *et al.* (2012) o uso desta técnica de biorremediação é eficaz, tanto do ponto de vista econômico, quanto no que se refere aos resultados obtidos em sentido ambiental, pois o processo estimula a atividade microbiana aeróbia do solo e garante a

⁷ Esses fatores interferem diretamente na atividade microbiana e na reação bioquímica, atingindo as proteínas e, conseqüentemente, a fisiologia celular.

degradação dos contaminantes pelos micro-organismos do solo, exigindo períodos de tempo de até dois anos para o caso de contaminantes com maior peso molecular.

Silva (2008) sugere que as vantagens desta tecnologia são que possui uma técnica de aplicação simples, que é eficaz para a eliminação de compostos orgânicos com baixas taxas de biodegradabilidade, e que os custos de implementação são relativamente baixos; já as desvantagens estão relacionadas com as áreas necessárias para aplicar o processo, a evaporação dos compostos orgânicos durante o processo, que pode causar outras problemáticas de poluição atmosférica, que não é eficiente em solos com elevada concentração de hidrocarbonetos e que a atividade microbiana é inibida em áreas com grandes concentrações de metais pesados.

4.2.2 A Atenuação Natural Monitorizada

O método de atenuação natural para a remediação de solos é definido como passivo, pois visa à atenuação natural dos impactos causados pelos compostos poluentes, por meio de processos físicos, químicos e biológicos promovidos na subsuperfície; dentre esses processos Andrade, Augusto e Jardim (2010) destaca a biodegradação, a adsorção, a diluição, a volatilização e a dispersão.

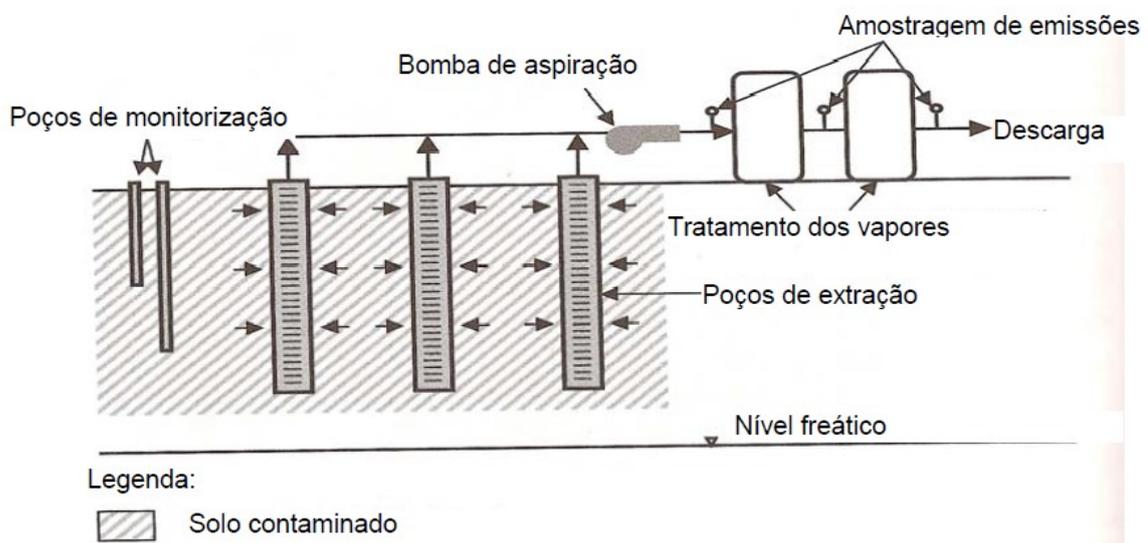
Conforme Kummer (2014) a capacidade ativa dos micro-organismos nos processos de mobilização acaba afetando a especiação dos metais, pois influencia de forma direta seu equilíbrio entre as fases líquida e sólida.

Dessa forma, Silva (2008) sugere que a biorremediação pode ser realizada por meio de duas abordagens principais, a primeira é a bioestimulação, que objetiva o crescimento dos micro-organismos, a partir da adição de substâncias (principalmente nutrientes), e a segunda é a bioadição, que está orientada à adição de micro-organismos, em ambos os casos a intenção é que os micro-organismos possam degradar o contaminante.

4.2.3 A Bioventilação

O método de Bioventilação envolve um processo de injeção de ar no solo contaminado (fundamentalmente na zona insaturada), como pode ser observado na Imagem 1 a seguir, portanto, pode ser denominado como um tratamento *in situ*, orientado à degradação aeróbia dos poluentes do solo, por meio dos micro-organismos que estão no próprio solo (SILVA, 2008).

Imagem 1 – Processo de Bioventilação



Fonte: Silva (2008).

A imagem apresenta de forma concisa os elementos fundamentais para a implementação do processo de Bioventilação, dentre os que destacam a bomba de aspiração, os poços de monitorização e os poços de extração.

Conforme Khan, Husain e Hejazi (2004) a bioventilação possibilita a descontaminação dos solos menos permeáveis, e ainda a degradação de componentes orgânicos de tipo volátil e semivolátil em zonas insaturadas, e isso representa uma grande vantagem, pois como foi observado anteriormente, a maior parte das limitações das outras técnicas refere-se a uma dessas duas questões.

Dentre as vantagens do processo destacam o uso de equipamentos de instalação simples, o tempo de tratamento curto para a obtenção dos resultados desejados (de até dois anos), sua compatibilidade com outras tecnologias, a possibilidade de tratamento de locais inacessíveis, a mínima perturbação do local (SILVA, 2008) e os custos de tratamento (KHAN; HUSAIN; HEJAZI, 2004).

Silva (2008) sugere que a limitação deste processo está diretamente relacionada com a necessidade de autorização para a injeção de nutrientes e, portanto, as demoras para iniciar o processo; por sua parte, Khan, Husain e Hejazi (2004) acrescentam a toxicidade dos contaminantes para os organismos, quando possuem altas concentrações, sua inaplicabilidade em determinadas condições (principalmente fora de zonas não saturadas) e a possibilidade de que os níveis de remediação não sejam atingidos.

4.2.4 A Fitorremediação

A fitorremediação é um processo aplicado em áreas contaminadas para remover, estabilizar, transferir, destruir e/ou degradar os contaminantes, orgânicos e inorgânicos, presentes em solos, sedimentos e águas superficiais com ajuda de plantas, aplicadas de forma direta no local comprometido para permitir a acumulação ou degradação desses contaminantes por via enzimática (LIMA, 2017).

Durante este processo podem incorporar-se ao solo diversos fertilizantes, corretivos e outras práticas de agronomia para garantir os resultados do tratamento, sendo que os compostos orgânicos de menor peso molecular podem se transportar através das membranas das plantas (ALVES *et al.*, 2016).

Conforme Kummer (2014) existem algumas plantas, conhecidas como hiperacumuladoras, que absorvem grandes quantidades de metais pelas raízes, sem ser prejudicadas, dessa forma, podem ser cultivadas em áreas contaminadas para garantir a recuperação/remediação da área; a única exigência desta técnica é que seja repetida até a remoção de todos os compostos tóxicos, isto é, até a descontaminação total do local e que se deve ter um cuidado especial com a disposição dos resíduos das plantas após seu uso, pois este resíduo pode ser perigoso.

Dentre os mecanismos utilizados durante a fitorremediação podem ser elencados: a extração do contaminante, a concentração do contaminante na planta, a degradação do contaminante (tanto por processos bióticos quanto por processos abióticos), a transpiração dos contaminantes para o ar e a imobilização do contaminante na raiz da planta (ALBERGARIA, 2010).

Este processo pode ser inclusive aproveitado na remoção de contaminantes originados de forma artificial, como produtos de petróleo, elementos-traço, pesticidas, metais e solventes; no entanto, sua eficácia depende do grau de contaminação e do tipo de contaminação e a implementação do processo envolve mais tempo do que outras técnicas convencionais (RUIZ *et al.*, 2012).

Conforme os resultados do estudo de Lima (2017) o processo de fitorreabilitação pode ser combinado com o processo de eletrorreabilitação para aumentar a eficácia e garantir os resultados esperados, pois esse segundo processo permite aumentar a biodisponibilidade dos contaminantes e melhorar a mobilidade das espécies polares para transportá-los facilmente até a raiz da planta.

É necessário apontar ainda que existem vários tipos de fitorremediação de solos, apresentados na Tabela 2, a seguir:

Tabela 2 – Tipos de fitorremediação

Tipo	Descrição	Mecanismo	Plantas
Fitoextração	Capacidade das plantas de capturar o contaminante por meio de suas raízes e traslocar para biomassa vegetal	Extração e captura do contaminante	Mostarda da Índia, Choupo híbrido, Girassol
Fitoestabilização	As plantas reduzem a mobilidade e biodisponibilidade dos contaminantes no ambiente, por efeitos físicos ou químicos	Confinamento	Mostarda da Índia, Choupo híbrido, Gramíneas
Fitodegradação	O contaminante é bioconvertido em formas menos tóxicas (ou não tóxicas) dentro dos tecidos vegetais, por meio da atividade enzimática das plantas	Destruição	Choupo híbrido, Salgueiro negro, Cedro
Fitovolatilização	As plantas capturam, traslocam e volatilizam o contaminante pela transpiração	Extração do contaminante e libertação para o ar	Mostarda da Índia, Alfafa, Choupos
Fitoestimulação/ Rizodegradação	Biodegradação do contaminante pela comunidade microbiana associada à rizosfera da espécie vegetal	Destruição	Choupo híbrido, Arroz, Taboa

Rizofiltração	As plantas terrestres absorvem, concentram e precipitam os contaminantes, principalmente em meios aquosos	Extração e captura do contaminante	Mostarda da Índia, Girassol, Jacinto
----------------------	---	------------------------------------	--------------------------------------

Fonte: Elaborado pelos autores a partir de ALBERGARIA (2010) e ALVES *et al.* (2016).

Observa-se na tabela a existência de seis tipos de fitorremediação, com determinados processos, mecanismos e plantas associadas, no entanto, outros autores incluem a fitotransformação como uma técnica adicional para a remediação dos solos, principalmente no caso de remoção de metais pesados (KUMMER, 2014).

Finalmente, cabe apontar que dentre as vantagens da fitorremediação são comumente apontadas os baixos custos, a eficiência nas reduções no solo e a fácil operação, sendo que as desvantagens são o alcance para sua aplicabilidade (apenas para contaminantes localizados a pequenas profundidades), que se trata de uma tecnologia sazonal, que exige um tempo superior para a descontaminação (quando comparada com outras técnicas), que não pode tratar solos com contaminação elevada ((ALBERGARIA, 2010; ALVES *et al.*, 2016), que precisa de alta biodisponibilidade de metais pesados no solo para garantir a eficiência e que dependendo da situação possui uma baixa eficiência (KUMMER, 2014).

4.2.5 As Eiras Biológicas

Uma das técnicas de biorremediação menos abordadas na literatura científica, mas importante de destacar neste trabalho de revisão bibliográfica, é a tecnologia de eiras biológicas, que se aproveitam do ar para a estimulação do crescimento e reprodução dos micro-organismos aeróbios, para que posteriormente esses micro-organismos degradem os contaminantes orgânicos do solo. O arejamento se consegue por meio da injeção de ar, após a adição de nutrientes, minerais e água (ALBERGARIA, 2010).

Dentre as vantagens desta técnica, Albergaria (2010) destaca os custos competitivos, a projeção e implementação simples e os tempos de tratamento mais curtos (quando comparados com outras técnicas); já as desvantagens são, segundo o autor, a dificuldade de conseguir concentrações finais ótimas, a possibilidade de que a biodegradação seja inibida

pela presença de metais em alta concentração, e a necessidade de áreas elevadas para o espalhamento do solo.

Finalmente, cabe apontar que, como observado ao longo das últimas páginas, as tecnologias de biorremediação de solos contaminados possuem diversas vantagens, sendo necessário destacar o fato de que cada uma das técnicas propostas está orientada a diminuir o impacto destes processos para o meio ambiente, uma questão que condiz com os atuais interesses ambientalistas.

Conforme apontado por Almeida (2004) e Santos (2009) a principal vantagem da biorremediação é que causa menos impacto ao meio, principalmente quando aplicada *in situ*, pois se aproveita de um consórcio de micro-organismos para a remediação, que diminuem ou eliminam totalmente a toxicidade dos poluentes presentes no meio.

Estas tecnologias de biorremediação mostram-se promissórias, devido a que, além do cuidado ambiental que representam, em condições ótimas exigem menor tempo para alcançar os resultados esperados (quando comparadas com outras técnicas), esse tempo varia entre 6 e 24 meses para quase todas as tecnologias de remediação biológica, ao mesmo tempo, representam menores custos, tanto na projeção quanto na implementação dos processos de remediação.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho de pesquisa, realizado por meio de uma revisão bibliográfica sistematizada, teve por objetivo identificar na literatura científica a importância da aplicação das tecnologias de biorremediação de solos contaminados, considerando suas vantagens e limitações, quando comparadas com outras tecnologias de remediação, tanto físicas, quanto químicas e térmicas.

Foi possível identificar, ao longo da pesquisa, que existem fundamentalmente cinco tipos de tecnologias de remediação biológica utilizados atualmente para a descontaminação do solo, a saber: o *landfarming*, a bioventilação, as eiras biológicas, a fitorremediação e a atenuação natural monitorizada; cada uma dessas tecnologias possui suas próprias características, mecanismos e procedimentos e, por esse motivo, cada uma apresenta vantagens e desvantagens particulares.

De modo geral, pode-se apontar que a importância de aplicar técnicas de biorremediação de solos contaminados está relacionada com sua vantagem principal, a saber: o fato de que, ao utilizar plantas e micro-organismos para a descontaminação dos solos como mecanismos de remediação, diminuem o impacto dos processos de remediação de solos para o meio ambiente, fundamentalmente por meio da eliminação dos poluentes ou da redução de sua toxicidade, tornando-os menos tóxicos que os iniciais ou, inclusive, não tóxicos, sem causar outras problemáticas.

Diversas pesquisas são ainda necessárias para verificar novos mecanismos de biorremediação de solos contaminados que venham diminuir as dificuldades, limitações e desvantagens destes processos, pois se mostram promissórios, devido a que, além do cuidado ambiental que representam, em condições ótimas exigem menor tempo para alcançar os resultados esperados (quando comparadas com outras técnicas), esse tempo varia entre 6 e 24 meses para quase todas as tecnologias de remediação biológica, ao mesmo tempo, representam menores custos, tanto na projeção quanto na implementação dos processos de remediação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBERGARIA, J. T. V. S. de. **Previsão do tempo de remediação de solos contaminados usando a Extração de Vapor**. 2010. 215 f. Tese (Doutorado em Engenharia do Ambiente) – Universidade do Porto, Porto, 2010.
- ALMEIDA, E. I. N. de. **Remediação de Solos Contaminados com Hexaclorociclohexano através da utilização do Dióxido de Titânio – Estudo na Cidade dos Meninos**. 2004. 91 f. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) – Escola Nacional de Saúde Pública, Rio de Janeiro, 2004.
- ALVES, O. R. *et al.* Biotecnologias de remediação de solos contaminados com agroquímicos. **AgrarianAcademy**, Goiânia, v.3, n.5, p. 26-50, 2016.
- ANDRADE, J. de A.; AUGUSTO, F.; JARDIM, I. C. S. F. Biorremediação de solos contaminados por petróleo e seus derivados. **Eclética Química**, São Paulo, v. 35, n. 3, p. 17-43, 2010.
- BALDISSARELLI, D. . *et al.* Remediation of soils contaminated by pesticides using physicochemical processes: a brief review. **Planta Daninha**, v. 37, p. 1-13, 2019.
- BRASIL. Resolução CONAMA nº 420, de 28 de dezembro de 2009. **Diário Oficial da União**, Brasília, n. 249, 30 dez. 2009, p. 81-84. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=620>>. Acesso em 13 dez. 2019.
- ESTEVES, R. C. **Modelagem teórica de aspectos hidrodinâmicos da tecnologia de extração multifásica**. 2012. 267 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- FERNANDES, H. G.; CHIAVONE FILHO, O.. Avaliação técnica da remediação de solo utilizando persulfato/peróxido de hidrogênio. **Revista Eletrônica de Petróleo e Gás**, a. 2, n. 2, p. 31-38, abr./set. 2014.
- HASHIM, Mohd Ali Bin. *et al.* Remediation technologies for heavy metal contaminated groundwater. **Journal of Environmental Management**, v. 92, n. 10, p. 2355-2388, out. 2011.
- KAUFMANN, C. R.. **Utilização da técnica eletrocinética para a remediação de areia contaminada com íons Pb**. 2015. 61 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerro Largo, 2015.
- KHAN, F.; HUSAIN, T.; HEJAZI, R. An overview and analysis of site remediation technologies. **Journal of Environmental Management**, v. 71, n. 2, p. 95-122, jun. 2004.
- KUMMER, L. **Remediação de solos contaminados por metais pesados usando biossurfactante produzido a partir de resíduo agroindustrial**. 2014. 198 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste de Paraná, Cascavel, 2014.

LIMA, J. R. C. **Aplicação de eletro-reabilitação a solos contaminados com tricloroetileno**. 2017. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Universidade do Porto, Porto, 2017.

MAGALHÃES, M. O. L.; SOBRINHO, N. M. B. do A.; MAZUR, Nelson. Uso de resíduos industriais na remediação de solo contaminado com cádmio e zinco. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 2, p. 219-227, abr./jun. 2011.

POLICARPO, N. A. **Tratamento de Solos Contaminados com Bifenilas Policloradas (PCBs)**. 2008. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

RIBEIRO, T. S.; CUNHA, P.; SILVA, L. A. P. Avaliação do Potencial de Biorremediação de Solos Contaminados: Método de Hidrólise de Diacetato de Fluoresceína (FDA) como Indicador de Atividade Microbiana. **Revista Águila**, n. 13, p. 105-120, jul./dez. 2015.

RUIZ, M. S.. *et al.* Tecnologias de remediação de áreas contaminadas com organoclorados: uma avaliação preliminar visando possíveis aplicações no sítio da Rua Cápua, Santo André – SP. **GeAS – Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, São Paulo, v. 1, n. 2, p. 102-123, jul./dez. 2012.

SANCHES, V. L. **Remediação de Solos da Formação São Paulo Contaminados por Vapores de Gasolina**. 2009. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SANTOS, J. S. **Remediação de solos contaminados com agrotóxicos pelo tratamento com radiação gama**. 2009. 57 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2009.

SILVA, M. S. C. R. P. da. **Avaliação e Remediação de Zona Contaminada por Hidrocarbonetos**. 2008. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2008.