

Técnicas de recuperação de áreas degradadas por lixões: Uma revisão sistemática da literatura

Techniques for the recovery of degraded áreas by landfills: A systematic literature review

Técnicas para la recuperación de áreas degradadas por vertederos: Una revisión sistemática de la literatura

Recebido: 26/03/2026 | Revisado: 30/03/2026 | Aceitado: 30/03/2026 | Publicado: 31/03/2026

Luísa Helena dos Santos Oliveira¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5632-2023>

Universidade Federal do ABC, Brasil

E-mail: luisa.oliveira@ufabc.edu.br

Rafaela Pires²

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8316-4080>

Universidade Federal do ABC, Brasil

E-mail: rafaela.pires@aluno.ufabc.edu.br

Resumo

Uma das grandes preocupações com os resíduos sólidos urbanos (RSU) são os danos ambientais e sociais causados pela degradação das áreas de disposição final. A disposição irregular de resíduos sólidos em lixões, que geralmente ocorre sem estudo ou projeto de engenharia, pode trazer diversos impactos ambientais como contaminação do solo e dos recursos hídricos, além da proliferação de doenças e seus vetores, odores desagradáveis, interferindo diretamente na qualidade de vida e saúde pública principalmente das pessoas que residem nas proximidades; somando-se a tudo isso também tem a desvalorização econômica dos imóveis dessas regiões. Considerando a importância dos aspectos sociais e ambientais da recuperação e reinserção na sociedade da área usada como lixão, o estudo de técnicas de recuperação de áreas degradadas se justifica pois é um importante instrumento para a melhoria da qualidade de vida da comunidade e uma tentativa de restabelecimento do equilíbrio ambiental. Portanto, o objetivo deste trabalho é expor e discutir técnicas que auxiliem na recuperação de áreas degradadas por lixões, através de pesquisa bibliográfica utilizando como fonte de dados artigos científicos, dissertações e teses oriundos da base de dados disponíveis nos sites da CAPES, Science Direct, Scopus e Google Acadêmico.

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos; Recuperação de áreas degradadas; Lixões.

Abstract

One of the major concerns with urban solid waste (MSW) is the environmental and social damage caused by the degradation of final disposal areas. The irregular disposal of solid waste in dumps, which usually occurs without a study or engineering project, can bring several environmental impacts such as contamination of soil and water resources, in addition to the proliferation of diseases and their vectors, unpleasant odors, directly interfering with the quality of life and public health mainly of people who live nearby; in addition to all this, there is also the economic devaluation of real estate in these regions. Considering the importance of the social and environmental aspects of the recovery and reintegration into society of the area used as a dump, the study of techniques for the recovery of degraded areas is justified because it is an important instrument for improving the quality of life of the community and an attempt to restore of environmental balance. Therefore, this study aimed to expose and discuss techniques that help in the recovery of areas degraded by dumps, through bibliographic research using as a source of data scientific articles, dissertations and theses from the database available on CAPES, Science Direct, Scopus and Google Scholar.

Keywords: Urban solid waste; Recovery of degraded areas; Dumps.

Resumen

Una de las principales preocupaciones respecto a los residuos sólidos urbanos (RSU) es el daño ambiental y social causado por la degradación de las zonas de disposición final. La disposición irregular de residuos sólidos en vertederos, que generalmente se realiza sin estudios ni proyectos de ingeniería, puede generar diversos impactos ambientales, como la contaminación del suelo y del agua, la proliferación de enfermedades y sus vectores, olores desagradables, que afectan directamente la calidad de vida y la salud pública, especialmente de las personas que viven cerca. Además, se produce

¹ CECS, UFABC – Universidade Federal do ABC, Brasil.

² EAU, UFABC – Universidade Federal do ABC, Brasil.

una devaluación económica de las propiedades en estas regiones. Dada la importancia de los aspectos sociales y ambientales de la recuperación y reintegración a la sociedad de las zonas utilizadas como vertederos, se justifica el estudio de técnicas para la recuperación de áreas degradadas, ya que constituye un instrumento importante para mejorar la calidad de vida de la comunidad y un intento por restablecer el equilibrio ambiental. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es presentar y analizar técnicas que faciliten la recuperación de áreas degradadas por vertederos, mediante una investigación bibliográfica que utiliza artículos científicos, disertaciones y tesis de las bases de datos disponibles en CAPES, ScienceDirect, Scopus y Google Scholar.

Palabras clave: Residuos sólidos urbanos; Recuperación de áreas degradadas; Vertederos.

1. Introdução

O modelo social atual está fundamentado em um alto nível de produção e consumo, ligado ao aumento populacional e a um processo de urbanização caótico e acelerado, gerando sérios problemas de saneamento, especialmente relacionados ao descarte de resíduos sólidos urbanos (Braga et al., 2002).

Os resíduos acumulam uma maior proporção de componentes sintéticos e poluentes, frequentemente se tornando fontes de compostos orgânicos voláteis, pesticidas, solventes e metais pesados (Gouveia, 2012), o que representa um risco crescente para a saúde humana e os ecossistemas. Apesar dos efeitos negativos da disposição inadequada de resíduos, uma parte significativa deles ainda não é manejada de forma correta.

Atualmente, o Brasil enfrenta sérios desafios na gestão de resíduos sólidos, particularmente em relação à sua disposição final. Nas últimas décadas, a produção de resíduos sólidos superou a taxa de crescimento da população, alcançando em 2019 uma soma de 79 milhões de toneladas anualmente. O total coletado representa 92% do que foi gerado, contudo, 17,5%, ou cerca de 13 milhões de toneladas por ano de resíduos sólidos urbanos (RSU), ainda são jogados em lixões, com índices mais elevados nas regiões norte e nordeste do país (Abrelpe, 2020).

Os lixões são caracterizados por descarregar resíduos sólidos diretamente no solo sem qualquer tipo de proteção ambiental (Oliveira et al., 2013), o que acarreta impactos negativos significativos ao meio ambiente, especialmente no solo e na água. Esses efeitos estão relacionados, entre outros fatores, à grande produção de chorume resultante da degradação dos resíduos orgânicos dispostos nos lixões, que acaba contaminando o ambiente (Resende et al., 2013; Araújo, 2014). Quando entra em contato com a chuva, o volume do chorume aumenta e é drenado para o solo, aquífero e rios, provocando impactos ambientais severos (Alberte et al.; 2005).

Ao longo do tempo, as regiões que receberam resíduos sólidos tendem a perder solo, vegetação e animais. As perturbações causadas pelas atividades de recebimento e armazenamento de resíduos dificultam a recuperação natural do ambiente (Souza, 2007). Quando as práticas de deposição de resíduos sólidos são interrompidas, os locais permanecem sem vegetação e se tornam inativos, o que representa um problema para a cidade (Beli et al., 2005). A recuperação de áreas afetadas por contaminação é um desafio, pois, após anos de interrupções, o ecossistema não apenas perde sua vegetação nativa, mas também as condições necessárias para sua recuperação natural (Almeida apud Carpanezzi et al., 1990). A intervenção humana é essencial nesse processo de reabilitação ambiental (Santos, 2012).

No Brasil, as formas mais comuns de descarte final de resíduos sólidos urbanos incluem lixões, aterros controlados e, a opção menos prejudicial, aterros sanitários. Apesar das melhorias nas práticas de separação, disposição, tratamento e descarte final, além de avanços legislativos nos setores de resíduos sólidos e saneamento básico nos últimos anos, todos esses métodos ainda geram impactos negativos para o meio ambiente e a saúde pública, portanto, é imprescindível mitigar os efeitos nessas áreas através de técnicas de reabilitação.

A lei número 12.305, sancionada em 2 de agosto de 2010, instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) no Brasil, com uma das metas voltadas para a eliminação e recuperação dos lixões. Devido aos danos causados, eliminar não é

suficiente; é preciso também encerrar as operações dos lixões com planos robustos de reabilitação da área afetada. No entanto, desde a promulgação da lei, o progresso tem sido lento e as metas frequentemente adiadas.

Baseando-se nas considerações mencionadas, este trabalho busca realizar uma revisão da literatura sobre as técnicas empregadas na reabilitação de áreas degradadas por lixões, identificando quais são as abordagens mais usadas atualmente e relacionando suas vantagens e desvantagens no processo de recuperação. Para isso, serão utilizados artigos científicos, teses e dissertações acessadas nas bases de dados da CAPES, Science Direct, Scopus e Google Acadêmico.

É fundamental um estudo contínuo em tecnologias e métodos que viabilizem o tratamento mais eficaz do volume de resíduos e dos efluentes líquidos e gasosos, além de promover um uso otimizado das áreas disponíveis para descarte final de resíduos sólidos, respeitando as características físicas, químicas e biológicas específicas dos locais.

A pesquisa é justificada pela sua relevância tanto direta quanto indireta em diferentes segmentos da sociedade. Sob a óptica econômica, a utilização de recursos naturais da região para a disposição de resíduos acarreta custos externos prejudiciais que, na maioria das vezes, são negligenciados, relacionados à desvalorização do local e das áreas adjacentes. A própria natureza dessas externalidades gera, como efeito, desafios técnicos e institucionais para a definição dos direitos de propriedade, resultando em uma subestimação dos custos associados em relação ao seu valor econômico e social real (Mta & Sayago, 1998). É crucial abordar de maneira séria os aspectos sociais e políticos da reabilitação e reintegração da área recuperada na vivência da comunidade impactada, uma vez que a restauração de áreas degradadas é uma ferramenta significativa para a elevação da qualidade de vida da população e uma tentativa de restaurar o equilíbrio ambiental.

Nesse contexto, a constante busca por conhecimento, inovação e aprimoramento das técnicas para a reabilitação de áreas danificadas se torna um recurso fundamental para o setor ambiental, contribuindo para a formulação de planos de gestão e recuperação que oferecem uma “nova oportunidade” para essas regiões que se tornaram insustentáveis social e ambientalmente.

O objetivo deste trabalho é expor e discutir técnicas que auxiliem na recuperação de áreas degradadas por lixões, através de pesquisa bibliográfica utilizando como fonte de dados artigos científicos, dissertações e teses oriundos da base de dados disponíveis nos sites da CAPES, Science Direct, Scopus e Google Acadêmico.

2. Metodologia

Realizou-se uma pesquisa documental de fonte direta em Legislação como é o caso da Lei 12.305, sancionada em 2 de agosto de 2010, instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) no Brasil, de normas da ABNT e de documentos como o do IBAM e, numa investigação indireta, de abordagem qualitativa (Risemberg et al., 2026; Pereira et al., 2018), de revisão sistemática (Galvão & Ricarte, 2020) em artigos da literatura utilizando as bases de dados da CAPES, Science Direct, Scopus e Google Acadêmico e, com o uso dos termos de busca: Resíduos sólidos urbanos; Recuperação de áreas degradadas; Lixões.

De acordo com Sampaio e Mancini (2007), um estudo que adota o método de revisão sistemática se baseia na utilização de métodos claros e organizados para pesquisa e compilação de informações, visando responder a uma pergunta específica, avaliando criticamente e, assim, procura resumir os resultados de estudos primários, caracterizando-se como um revisamento retrospectivo. Com o propósito de construir uma análise crítica do material estudado, a revisão sistemática visa aprimorar as pesquisas por dados, buscando obter o máximo de resultados pertinentes possíveis (Sampaio & Mancini, 2007). O primeiro passo para a criação de uma revisão sistemática envolveu a formulação da pergunta, que deve ser explícita e bem estruturada para guiar uma investigação científica eficaz (Sampaio & Mancini, 2007). Para este trabalho, a pergunta orientadora foi: “Quais são as técnicas mais comuns para a recuperação de áreas degradadas por lixões e quais delas estão sendo mais adotadas atualmente?”.

O próximo passo indispensável foi definir as fontes de dados e as palavras-chave para a busca. Para esta revisão sistemática, foram utilizados artigos acadêmicos, dissertações e teses disponíveis nas bases de dados CAPES, Science Direct, Scopus e Google Acadêmico. Como a literatura nesta área ainda é escassa em português, também foram incluídas palavras-chave em inglês que estavam intimamente relacionadas ao tema abordado.

Durante a busca por resultados, foi crucial aplicar o critério de exclusão que consistia na “adequação da publicação ao tema deste estudo”, com o objetivo de limitar a busca apenas a publicações focalizadas na apresentação de técnicas para a recuperação de áreas degradadas por lixões ou aterros sanitários desativados.

Para aplicar os critérios de inclusão ou exclusão, foi realizada a leitura dos títulos e resumos das publicações. Quando a análise do título e resumo não foi suficiente para avaliar a relevância da obra para a revisão, foram examinados os métodos e, caso a relação com a pesquisa ainda não estivesse clara, a leitura completa da publicação era feita.

3. Resultados e Discussão

Resíduos Sólidos: Contextualização Geral, Disposição Final e Desativação dos Lixões

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da Norma Brasileira Registrada (NBR) 10.004 (2004), descreve resíduos sólidos (RS) como:

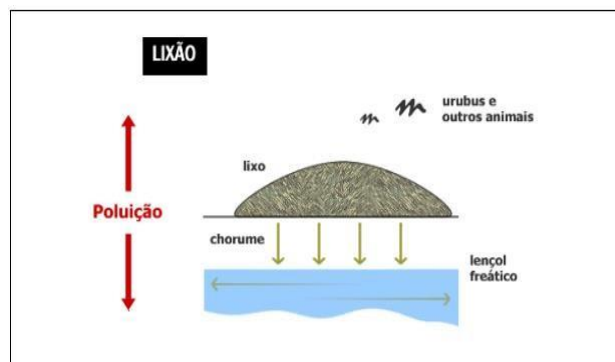
“Material em estado sólido ou semissólido resultante de atividades industriais, residenciais, hospitalares, comerciais, agrícolas, de serviços e varrição. Esta definição abrange lodos gerados por sistemas de tratamento de água, lamas produzidas em instalações de controle de poluição, além de certos líquidos que, por suas características, não podem ser despejados na rede pública de esgoto ou em corpos hídricos, ou que exigem soluções técnicas e economicamente inviáveis considerando a tecnologia disponível” (ABNT NBR 10004, 2004.)

Em contraste com a definição anterior, o lixo é visto como algo que não pode ser reaproveitado. Conforme Lima (2004), lixo refere-se a qualquer resíduo decorrente das atividades diárias humanas que não possui mais utilidade e é descartado.

No Brasil, a responsabilidade pela gestão dos serviços públicos, incluindo a administração dos resíduos sólidos, recai sobre os municípios. Esse processo se inicia com a coleta de lixo, que faz parte do sistema de limpeza urbana, abrangendo etapas como geração, armazenamento, coleta, transporte, tratamento e descarte final dos resíduos sólidos (Ibam, 2001).

No Brasil, existem três principais métodos para o descarte final dos resíduos sólidos: lixão, aterro controlado e aterro sanitário (Oliveira et al., 2013). Entretanto, o lixão é considerado a alternativa mais inadequada, sendo definido por Braga et al, Op.cit (2002), como um local destinado ao despejo de lixo sem planejamento ou consideração pela saúde pública e meio ambiente, sem tratamento e sem quaisquer critérios de engenharia. Na Figura 1, é possível identificar as características fundamentais de um lixão.

Figura 1 - Esquema simplificado de um lixão.



Fonte: Eco Clean Ambiental (2018).

Do ponto de vista ambiental, os aterros sanitários intensificam a poluição do ar, do solo e da água, além de criar problemas estéticos. Quando o lixo é descartado em encostas, pode haver instabilidade nas áreas inclinadas devido à pressão e retenção temporária da água da chuva, levando a deslizamentos (UFBA/Caixa, 1998). A Figura 2 demonstra os principais efeitos ambientais resultantes dos lixões.

No aspecto social, os lixões a céu aberto têm um impacto na estrutura comunitária. Essas áreas atraem populações de baixa renda nas proximidades, que procuram na coleta e venda de materiais recicláveis uma forma de gerar renda (Feam, 1995). Os catadores de lixo, que dependem dessa atividade para sobreviver, acabam construindo suas moradias nos próprios lixões. Segundo Azambuja et al. (2015), as condições em que atuam esses catadores são extremamente insalubres e apresentam altos riscos à saúde.

Figura 2 - Impactos ambientais causados pelos lixões.

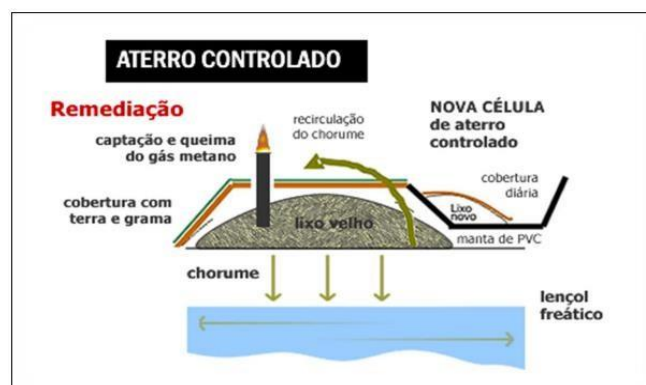


Fonte: Fundação Estadual de Meio Ambiente - Feam (2008).

Conforme a NBR 8849/1985 da Associação Brasileira de Normas Técnicas, a ABNT define que o aterro controlado é uma metodologia para a disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, assegurando que não haja prejuízos ou perigos à saúde pública e à segurança, ao mesmo tempo que busca reduzir os danos ao meio ambiente. Este procedimento aplica conceitos de engenharia para isolar os resíduos sólidos, sendo cobertos com uma camada de material inerte ao final de cada dia de trabalho.

O aterro controlado (Figura 3) serve como uma solução intermediária entre um lixão e um aterro sanitário. Nesse modelo de aterro, os resíduos são diariamente cobertos, embora não possuam um sistema de impermeabilização do solo e, em algumas situações, não tenham um sistema eficaz de drenagem para o chorume e os gases.

Figura 3 - Esquema simplificado de um aterro controlado.



Fonte: Eco Clean Ambiental (2018).

De acordo com a NBR 8419/1996 da ABNT, a técnica de aterro sanitário se refere ao método de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, de forma a evitar impactos na saúde pública e na segurança, ao mesmo tempo que busca reduzir os efeitos adversos ao meio ambiente. Este processo utiliza princípios de engenharia para restringir os resíduos sólidos a uma área reduzida e diminuir seu volume ao mínimo permitido, cobrindo-os com uma camada de terra ao final de cada dia de trabalho, ou em intervalos menores, se necessário.

A construção do aterro sanitário é realizada considerando diversas exigências técnicas, como a impermeabilização do solo, a drenagem dos gases, o tratamento e a drenagem do chorume, além do recobrimento diário e do cubrimento dos resíduos compactados, como mostrado na Figura 4. Essas medidas são essenciais para atenuar os danos ambientais e sociais.

Figura 4 - Esquema simplificado de um aterro sanitário.



Fonte: Eco Clean Ambiental (2018).

A Lei 12.305/2010, que criou a Política Nacional de Resíduos Sólidos, estabelece objetivos como o fechamento de lixões e locais impróprios para o descarte, a promoção da reciclagem, a reutilização, a implementação de tecnologias sustentáveis e, acima de tudo, o Plano de Resíduos Sólidos. Este plano abrange os diversos tipos de resíduos que são gerados, propondo alternativas de gerenciamento que devem ser implementadas, alinhadas com as ações necessárias ao crescimento econômico (BRASIL, 2010).

De acordo com Pereira (2011), o principal valor da Lei 12.305/2010 reside, antes de tudo, em sua própria criação, pois representa um marco na legislação ambiental no Brasil. Ela introduz mecanismos como a logística reversa, planos de gestão, a coleta seletiva, a responsabilidade compartilhada, além de promover a inclusão social e profissional dos catadores de materiais recicláveis, tornando-se uma legislação bastante relevante e inovadora diante dos desafios relacionados aos resíduos sólidos.

Assad e Siqueira (2016) apontam que existem obstáculos para a implementação de uma gestão eficiente, como a carência de recursos, de profissionais capacitados e, sobretudo, de vontade política. Eles também enfatizam a importância de criar condições para que os profissionais possam atuar na gestão de resíduos sólidos nas cidades, sendo essencial que haja articulação política, pois é necessário integrar as secretarias de meio ambiente, saúde, saneamento e educação, priorizando a gestão dos resíduos.

Dessa forma, lixões e locais inadequados continuam a existir. As sanções penais e administrativas, assim como as proibições e regulamentações, nunca foram aplicadas na prática em relação aos resíduos, embora estejam previstas nas leis (Calixto, 2015).

Os lixões estão sendo paulatinamente substituídos por centros de triagem, compostagem e aterros sanitários. No entanto, o fechamento de áreas onde os lixões estavam localizados, muitas vezes, é feito sem critérios adequados, resultando apenas no encerramento do descarte de resíduos, no fechamento e no abandono desses espaços (Lanza, 2010).

As áreas que abrigaram lixões, mesmo após sua desativação, verão seu uso comprometido devido aos efeitos da disposição inadequada de grandes volumes de lixo ao longo dos anos. Substâncias químicas presentes tanto em resíduos industriais quanto no chorume podem permanecer no solo e serem absorvidas por plantas, não sendo recomendável o consumo dessas culturas (Sisinno, 2000).

Conforme Feam (2010), mesmo com o encerramento das operações dos lixões, continuam a geração de gases, chorume e odores enquanto houver atividade biológica dentro do monte de resíduos, o que pode levar à poluição do ar e das águas, além de problemas de instabilidade no solo e degradação do ambiente.

A gestão de resíduos sólidos urbanos tornou-se complicada devido ao volume de resíduos gerados, à expansão das áreas urbanas, aos impactos tecnológicos e à escassez de recursos públicos e naturais (Almeida et al., 2009). Para uma estratégia eficaz na gestão de resíduos sólidos, as ações devem incluir políticas públicas e desenvolver soluções que favoreçam a redução na origem dos resíduos, a utilização de técnicas de reaproveitamento, o tratamento dos resíduos descartados e um plano sanitário para seu descarte final (Marques, 2012).

Levando em conta tudo o que foi discutido até aqui, é fundamental que os lixões sejam restaurados e tenham a tecnologia adequada instalada para a extração de gás, que os efeitos sobre o meio ambiente sejam reduzidos por meio do tratamento do líquido percolado e da vigilância ambiental, e que os aterros sanitários sejam planejados, licenciados, construídos, geridos e supervisionados utilizando tecnologia avançada (Felipetto, 2007).

Recuperação De Áreas Degradadas Por Lixões

Atualmente, o país possui uma variedade de legislações ambientais, mas ainda é necessário realizar avanços, principalmente em relação à supervisão da aplicação dessas normas. No Brasil, há diversas legislações específicas que abordam situações particulares de recuperação, dependendo da atividade executada ou do que se pretende alcançar na área. Logo, a seguir, serão apresentados alguns conceitos referentes às legislações mais relevantes sobre a recuperação de áreas prejudicadas.

O artigo 225 da Constituição Federal afirma que “todos têm direito a um meio ambiente ecologicamente equilibrado, que é um bem comum da população e fundamental para uma boa qualidade de vida, cabendo ao Poder Público e à sociedade o dever de protegê-lo e conservar para as gerações atuais e futuras”. No parágrafo 2º, é mencionado que: “Aquele que extrair recursos minerais deve recuperar o meio ambiente afetado, conforme a solução técnica exigida pela autoridade pública competente, conforme a legislação”.

A recuperação de áreas danificadas é uma exigência na Política Nacional do Meio Ambiente, que está estabelecida na Lei nº 6.938, sancionada em 31 de agosto de 1981. O artigo 2º dessa lei tem como finalidade a proteção, aprimoramento e restauração da qualidade ambiental que propicie a vida, buscando garantir condições para o desenvolvimento socioeconômico no país, interesses da segurança nacional e a proteção da dignidade humana, respeitando os seguintes princípios: VIII - recuperação de áreas degradadas.

Conforme Romeiro (2014), existem vários conceitos que envolvem os processos de recuperação de áreas degradadas, que definem as técnicas utilizadas para restaurar as características do local após os danos causados. Entre os termos empregados, os principais incluem: Restauração, Reabilitação e Recuperação. O Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), conforme a Secretaria do Meio Ambiente de São Paulo (2005), apresenta as definições desses conceitos, que dependem dos objetivos da recuperação desejada:

- Restauração – refere-se ao objetivo de restabelecer as condições originais exatas do ambiente, como eram previamente à interferência;
- Recuperação – está relacionada à ideia de que a área alterada deve apresentar qualidades semelhantes às anteriores, restabelecendo o equilíbrio dos processos ambientais;

- **Reabilitação** – é uma abordagem utilizada quando a melhor (ou talvez a única viável) alternativa é o desenvolvimento de uma atividade que seja adequada para o uso humano em vez de tentar restaurar a vegetação original, desde que planejada para evitar impactos negativos no ambiente.

Para a recuperação de áreas afetadas pela disposição de resíduos sólidos urbanos, é fundamental realizar uma avaliação prévia das condições ambientais prejudicadas do local; ou seja, é necessário fazer análises do solo e das águas subterrâneas, avaliar o grau de decomposição dos resíduos e as condições de estabilidade e permeabilidade do solo. Essas análises têm como objetivo identificar as vias potenciais de transporte de poluentes e os riscos ambientais (Alberto et al., 2005).

Conforme Alberte (2003), após a finalização das análises, é fundamental escolher atividades corretivas; esses procedimentos visam diminuir a mobilidade, a toxicidade e a quantidade de contaminantes. A recuperação de aterros envolve gestão ambiental e uso do solo de forma lógica, prática e financeiramente sustentável.

A restauração de uma área afetada por descarte inadequado de resíduos urbanos deveria começar com a retirada total dos materiais dispostos, levando-os para um aterro sanitário. No entanto, essa abordagem exige altos investimentos, o que torna esse método economicamente inviável (Ibam, 2001). Assim, é necessário implementar soluções mais simples e acessíveis para reduzir os obstáculos na reabilitação da área deteriorada.

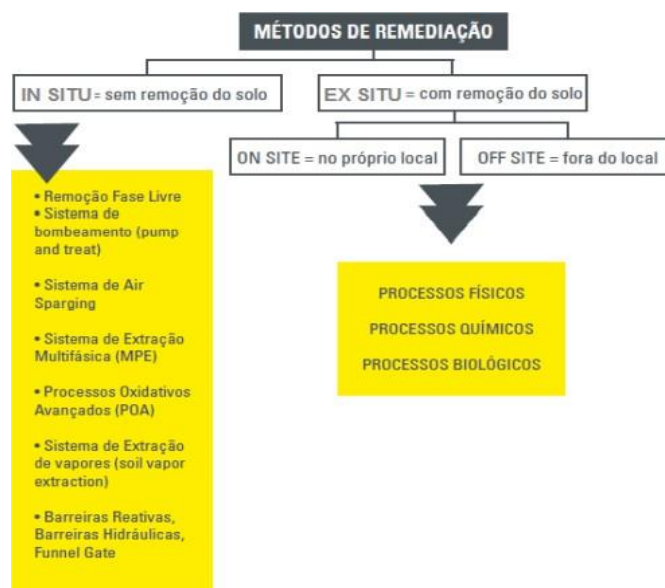
Técnicas de Recuperação

Desenvolver projetos para a recuperação de áreas de aterro é desafiador devido às características específicas de cada local degradado, ao nível de comprometimento e aos recursos financeiros disponíveis na cidade, como na Figura 5 (Feam, 2008). Portanto, é essencial conduzir estudos que descrevam a área degradada dos aterros e os tipos de resíduos e potenciais poluentes antes de decidir quais técnicas de recuperação utilizar. Afinal, ao compreender melhor a área, é possível identificar as metodologias que realmente serão eficazes na recuperação desses locais (Resende et al., 2013).

Segundo Tavares (2013), existem diversos métodos para a reabilitação de áreas contaminadas. Eles podem ser categorizados em tratamentos *in situ*, que ocorrem diretamente no local da contaminação, e tratamentos *ex situ*, que implicam a remoção do solo para outra localização onde será feita a limpeza. Os tratamentos *in situ* são mais destacados globalmente por apresentarem custos menores em comparação aos tratamentos *ex situ*, uma vez que eliminam a necessidade de transporte do solo e reduzem o risco de contaminação a outras áreas que pode acontecer com os tratamentos *ex situ* (Tavares, 2013).

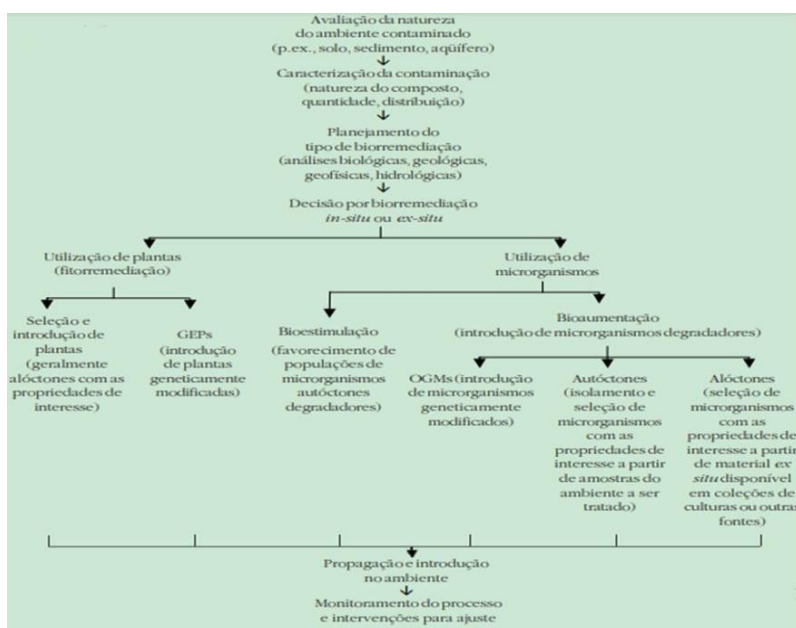
Os pesquisadores Florentino Santos et al. (2011) e Bittar e Braga (1995) estão de acordo em que a recuperação de áreas afetadas por resíduos sólidos envolve ações geotécnicas, remediações químicas e/ou biológicas, além do uso de vegetação. Há uma variedade de técnicas disponíveis e, frequentemente, é necessário aplicá-las em conjunto para lidar com a ampla gama de componentes tóxicos resultantes da decomposição dos resíduos sólidos. A Figura 6 ilustra um diagrama que detalha toda a complexidade das etapas principais para a definição e execução de um processo de biorremediação, por exemplo.

Figura 5 - Técnicas de recuperação / remediação.



Fonte: Fiemg (2011).

Figura 6 - Diagrama geral das etapas para a definição e execução de um processo de biorremediação.



Fonte: Gaylarde, C. C.; Bellinaso, M. D. L.; Manfio, G. P. (2005),

A seguir, são apresentadas algumas técnicas que auxiliam na recuperação das áreas degradadas por lixões.

Biorremediação

De acordo com Lima (2002) a biorremediação é o conceito mais atual para tratamento de aterros sanitários, aterros controlados e lixões, focado na minimização dos impactos negativos ao meio ambiente, na ampliação da vida útil e na reversão do quadro crítico.

A biorremediação é caracterizada como tecnologia que utiliza agentes biológicos, especificamente, os microrganismos, para remover contaminantes tóxicos do solo e da água (Pelczar et al., 1997). Trata-se de uma técnica na qual ocorre a

transformação ou destruição dos poluentes orgânicos por decomposição, pela ação de microrganismos naturais no solo, como as bactérias, os fungos e protozoários. Os microrganismos promovem a biodegradação de poluentes tóxicos, para obtenção de energia (que será transformado em alimento), em substâncias como dióxido de carbono, água, sais minerais e gases. Assim, o contaminante funciona como uma espécie de fonte de carbono para os microrganismos. Dentre os compostos biodegradáveis estão os hidrocarbonetos derivados do petróleo, preservantes de madeira, solventes halogenados e os defensivos agrícolas (Cetesb, 2007).

Segundo a Usepa, Environmental Protection Agency, Agência Americana de Controle Ambiental, a biorremediação pode ser classificada no rol das tecnologias novas, caracterizando-se pela via destrutiva, onde a atividade biológica é responsável pelos resultados na transformação e minimização dos agentes poluentes. A Usepa também considera a biorremediação uma tecnologia que permite não só o tratamento da fração sólida, como a sua parte líquida dos resíduos presentes nos lixões e aterros. No Quadro 1 é possível verificar algumas vantagens e limitações da biorremediação.

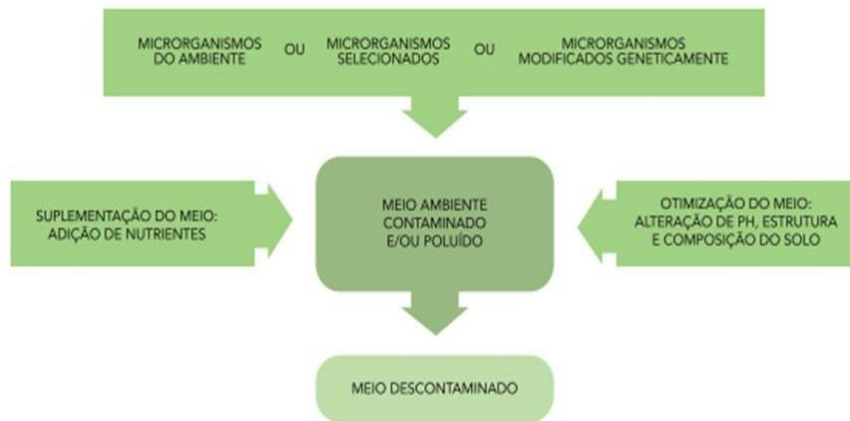
Quadro 1 - Vantagens e desvantagens da biorremediação.

Vantagens	Limitações
A habilidade dos microrganismos de biodegradar substâncias perigosas ao invés de transferir o contaminante de um meio para outra (Cetesb, 2007)	A suscetibilidade do contaminante considerado à degradação; (Cetesb, 2011)
Eficiência em meios homogêneos e de textura arenosa (Cetesb, 2007).	Presença de populações microbiológicas apropriadas e em quantidades suficientes para promover uma taxa de degradação adequada; (Cetesb, 2011)
Baixo custo se comparado a outras técnicas de remediação (Cetesb, 2007)	Condições do pH e temperatura para o crescimento dos microrganismos; (Cetesb, 2011)
Se os compostos forem facilmente degradáveis a tecnologia pode ser considerada como destrutiva dos contaminantes (Cetesb, 2007)	Biodisponibilidade do contaminante; (Cetesb, 2011)
Elevada diversidade de ação, permitindo a incorporação dessa técnica a uma variedade de agentes contaminantes e poluentes (Lacerda, 2019)	Geração de subprodutos que sejam menos tóxicos que os produtos primários; (Cetesb, 2011)
	Capacidade do meio de sustentar atividade biológica (Cetesb, 2011)

Fonte: Autoria própria.

As tecnologias de biorremediação podem ser classificadas como: “in-situ” ou “ex-situ”. A “in-situ” é um método onde a transformação ou destruição dos contaminantes ocorre no próprio local, enquanto a “ex-situ” consiste na remoção do material contaminado para tratamento em local externo ao de sua origem. A remediação “in situ” ocorre através da ação de microrganismos no próprio local, sem que o solo tenha que ser escavado, o que torna esse método muito atrativo para a recuperação de áreas degradadas por lixões (Cetesb, 2007). Essa opção de biorremediação (Figura 7) torna o processo mais atrativo e economicamente viável. Além disso, acarreta menores impactos ambientais advindos da remediação da área contaminada (Andrade et al., 2010).

Figura 7 - Etapas da biorremediação in-situ.



Fonte: Lacerda (2019).

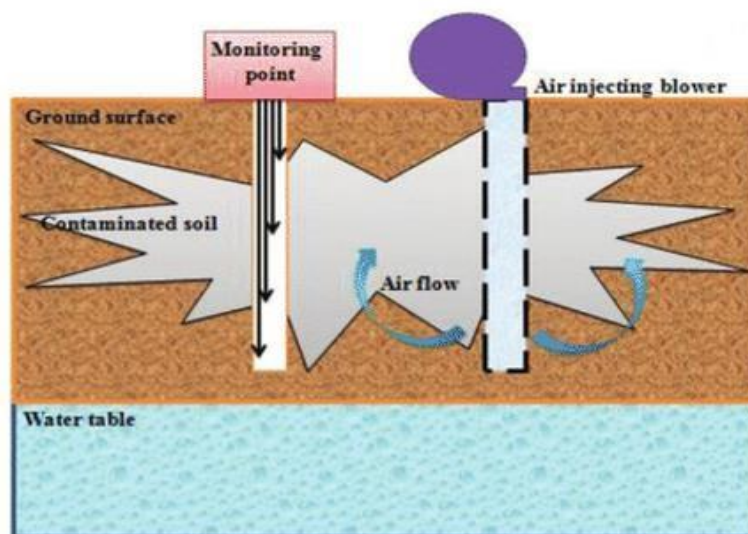
Os processos de biorremediação constituem processos simples e aplicáveis a grandes áreas (Bento et al, 2004). Dentre as várias técnicas de biorremediação que podem ser realizadas, as mais utilizadas são a atenuação natural, a bioaumentação e a bioestimulação (Martins et al., 2003).

Bioventilação

A técnica de bioventing ou bioventilação como é conhecida, é uma técnica de bioestimulação que se caracteriza pela adição de oxigênio através do solo para estimular o crescimento dos organismos naturais e/ou introduzidos pela bioaumentação.

De acordo com os autores Fernandes e Alcântara (2002), a bioventilação é uma técnica de remediação “in situ”, baseada na degradação de contaminantes orgânicos adsorvidos no solo pela ação de microrganismos de ocorrência natural, onde a atividade destes é melhorada pela introdução de um fluxo ar (oxigênio) na zona não saturada, usando poços de injeção ou extração e caso necessário, adicionando-se macronutrientes ao meio (Figura 8). É uma técnica de baixo custo e ideal para grandes volumes (Cetesb, 2007).

Figura 8 - Modelo de bioventilação no tratamento de solos contaminados.



Fonte: Scalvenzi, Maddela Naga Raju And Laura. Petroleum Degradation: Promising Biotechnological Tools for Bioremediation.

Segundo Lima (2010) o método usado no processo de bioventilação é eficiente no tratamento de qualquer poluente degradável em meio aeróbico, particularmente é muito efetiva na remediação de solos contaminados por hidrocarbonetos de petróleo, sendo mais indicada para locais onde ocorreu a liberação de compostos com peso molecular médio.

Técnicas de bioventilação também têm sido usadas com sucesso para remediar solos contaminados por solventes não clorados, alguns pesticidas, conservantes de madeira e outros produtos químicos orgânicos. Embora a biorremediação não possa degradar contaminantes inorgânicos, a biorremediação pode ser usada para alterar o estado de valência de inorgânicos e causar adsorção, absorção, acúmulo e concentração de inorgânicos em micro ou macro-organismos. Embora ainda em grande parte experimental, essa técnica mostra uma promessa considerável de estabilizar ou remover inorgânicos do solo (FRTR, online).

As principais vantagens desse método são: utilização de equipamentos de fácil aquisição e instalação, minimização da extração de vapores, com redução dos custos de seu tratamento, pode ser implantado sem causar grande impacto na operação da área e a atuar em áreas de difícil acesso. As principais desvantagens ressaltam-se a sua não aplicabilidade onde as concentrações de contaminantes impedem a biodegradação ou em solos com baixa permeabilidade, não possibilitando que metas de remediação muito baixas sejam atingidas (Alvarez & Ilman, 2006).

Além de considerar as limitações citadas anteriormente, é necessário atender dois critérios básicos para que a técnica de bioventilação seja bem-sucedida, primeiro critério é que o ar deve ser capaz de passar pelo solo em quantidade suficiente para manter as condições aeróbicas; segundo critério, os microrganismos devem estar presentes em concentrações suficientemente grandes para obter taxas razoáveis de biodegradação. Portanto, o tamanho do grão do solo e a umidade do solo influenciam significativamente a permeabilidade aos gases do solo (FRTR, online).

Biofiltração

A técnica de biofiltração tem sido usada em escala comercial para controle de odor no tratamento de esgotos por muitos anos e é promissora também para controle na emissão de solventes (Wu, 1998). Um exemplo é aplicação inovadora de biofiltros para promover a oxidação de metano proveniente de aterros sanitários e pode ser aplicado também junto com outras medidas mitigadoras e recuperadoras nos lixões.

A biofiltração do metano é uma técnica que já vem sendo utilizada para o tratamento de correntes residuais geradas em aterros sanitários em processo de fechamento (quando a concentração de CH₄ no biogás é tão baixa que impede o seu tratamento térmico ou aproveitamento energético) (Nikiema et al., 2007; Park et al., 2009), em minerações de carvão mineral (Sly et al., 1993) e em suinoculturas (Girard et al., 2011; Veillette et al., 2012).

A tecnologia de Biofiltração utiliza para limpeza de ar microorganismos para quebrar compostos odorantes em compostos não odorantes. É um processo em que o gás poluído é purificado através de sua passagem por um meio poroso biologicamente ativo, isso oferece um número de vantagens para tratar gases poluídos com baixas concentrações de compostos químicos (Wu et al., 1998).

Os compostos são absorvidos, principalmente a água, o gás carbônico, os sais minerais, alguns compostos orgânicos voláteis e microorganismos, e então biologicamente degradados. O equipamento para efetuar este processo é simples e requer pouca energia, nesse processo a unidade de tratamento denomina-se biofiltro, que se trata de reatores trifásicos, de leito empacotado, empregando partículas porosas de base orgânica. O biofiltro consiste de um recipiente com material orgânico habitado com microorganismos, onde o ar odorante é passado, usualmente em fluxo ascendente, o ar que entra pode ser pré-umidificado para manter a umidade adequada no leito orgânico (Mcnevin, 2000).

A biofiltração é viável e possui uma excelente relação custo-benefício para tratamento de correntes de ar com baixa concentração de poluentes. O baixo custo de operação resulta da utilização da oxidação microbiológica nas condições

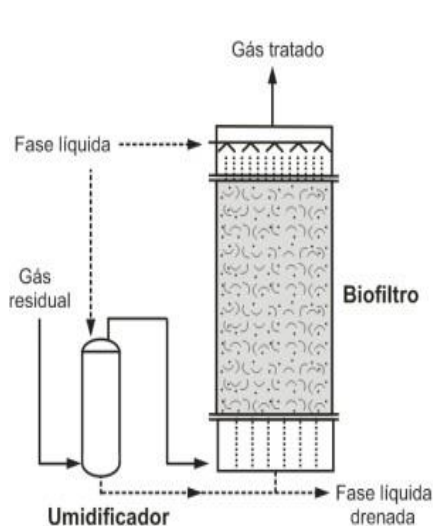
ambientais, sob determinadas condições, alta eficiência de remoção pode ser alcançada e o processo não agride o meio ambiente.

Existem algumas limitações para a aplicação da biofiltração, em relação ao metano (CH_4), a concentração de oxigênio no biofilme poderá ser um fator limitante apenas no caso do tratamento de correntes gasosas com elevadas concentrações de poluentes nos processos em que a circulação de ar no leito filtrante é feita de forma natural, como é o caso das camadas filtrantes utilizadas na cobertura final de aterros sanitários (chamadas de biocovers), que objetivam a remoção do CH_4 residual emitido pela superfície do aterro (Stein et al., 2001; Stern et al., 2007). A baixa solubilidade do metano (CH_4) em água também pode limitar a aplicação da técnica de biofiltração de gases residuais devido à dificuldade de transferência de massa do CH_4 da fase gasosa para o biofilme, onde as bactérias oxidadoras de CH_4 fazem a conversão deste a dióxido de carbono (CO_2) e biomassa. Mesmo assim, muitos autores propuseram o uso de técnicas biológicas para a oxidação do metano contido em emissões fugitivas de suinocultura, mineração de carvão mineral, e aterros sanitários (Sly et al., 1993; Melse & Vander Werf, 2005; Gebert & Grongroft, 2006; Park et al., 2009).

Na técnica de biofiltração existem até o momento, três configurações de reatores mais utilizadas para o tratamento biológico de correntes gasosas (Edwards & Nirmalakhandan, 1996; Belli Filho et al., 2001a; Kennes & Veiga, 2001; Noyola et al., 2006; Syed et al., 2006; Kennes et al., 2009a, 2009b)

O biofiltro, como apresentado na Figura 9, é a configuração mais simples utilizada para o tratamento biológico de gases residuais. O processo consiste em um leito fixo de material suporte através do qual o gás é insuflado (em sentido ascendente ou descendente). A biomassa cresce aderida a esse meio, formando um biofilme, onde é realizada a oxidação biológica dos poluentes (Andrews e Noah, 1995). Para a formação e o crescimento do biofilme, o material suporte deve ser umidificado, sendo esse procedimento feito de duas formas (Kennes et al., 2009a): (i) pré-umidificação da corrente gasosa que adentra o reator (saturação da corrente gasosa com água); (ii) aspersão de água na extremidade superior ou ao longo do perfil do material suporte (adição de fase líquida ao reator).

Figura 9 - Modelo simplificado de um biofiltro.



Principais características dos biofiltros:

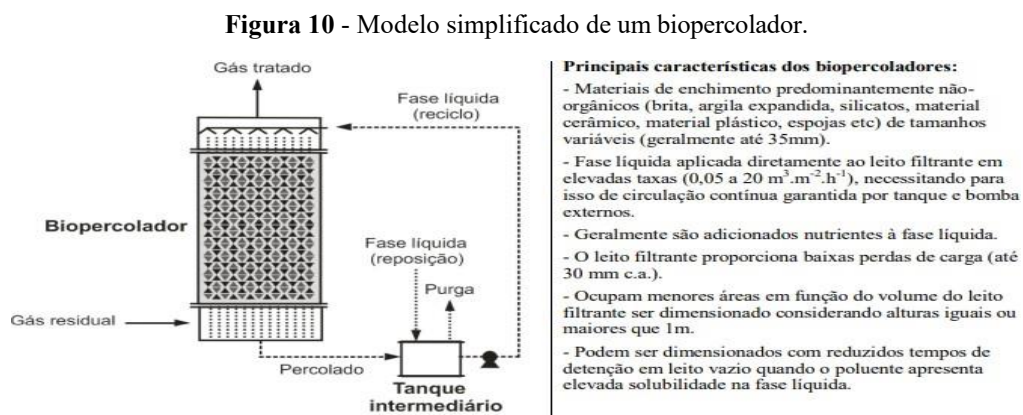
- Materiais de enchimento predominantemente orgânicos (solo, turfa, composto orgânico) com granulometria variável de 2 a 20mm, podendo ser misturados a outros materiais não-orgânicos ou de maiores dimensões (até 35mm) como cavaco de madeira, brita, argila expandida, silicatos, material cerâmico, material plástico, fibras etc.
- Umidade do leito filtrante variável de 40 a 60%, mantida por meio da pré-umidificação da corrente gasosa afluente ou da adição de fase líquida diretamente ao leito filtrante em uma taxa muito baixa, geralmente menor que $0,004 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$.
- Nutrientes podem ou não ser adicionados à fase líquida, dependendo da proporção de fase orgânica fonte de nutrientes no leito filtrante.
- O leito filtrante proporciona elevadas perdas de carga (até 1.200 mm c.a.).
- Ocupam elevadas áreas em função do volume do leito filtrante ser dimensionado considerando alturas de no máximo 1m.

Fonte: Brandt, Emanuel Manfred Freire (2016).

A principal diferença entre um biofiltro e um biopercolador (Figura 10) é a funcionalidade e forma de aplicação da fase líquida. Em um biofiltro, a fase líquida geralmente é água e tem a função primordial de umidificação do meio suporte, podendo

em alguns casos ter a função adicional de fornecimento de nutrientes. O excesso de umidade é recolhido pelo dreno na parte inferior do biofiltro (Wef, 2004). Já no caso do biopercolador, além de promover a umidificação do meio suporte, a fase líquida tem a função de fornecer os nutrientes necessários ao desenvolvimento da biomassa, sendo aplicada em velocidades superficiais muito superiores às dos biofiltros, em alguns casos inclusive é retornada constantemente no reator (Kennes et al., 2009a). Para manter a fase líquida em recirculação, é empregado um reservatório característico onde é possível se fazer a adição de água e nutrientes ou a purga de fase líquida saturada com subprodutos da atividade da biomassa, a exemplo das substâncias poliméricas extracelulares. Ademais, a fase aquosa em recirculação permite uma melhor absorção de poluentes devido à contínua transferência de massa entre as fases gasosa e líquida (Kenner & Veiga, 2001). Devido ao emprego de materiais de enchimento que proporcionam menores perdas de carga, os biopercoladores podem apresentar leitos filtrantes com maiores alturas se comparados aos biofiltros.

O biolavador é o menos utilizado para a biofiltração de gases, possui certa limitação quando utilizada para a remoção de compostos pouco solúveis em água, que é o caso do metano, logo essa configuração não será discutida.



Fonte: Brandt, Emanuel Manfred Freire (2016).

Fitorremediação

Segundo Monteiro (2008), a utilização de plantas como elementos remediadores e de estabilização de solos pode ser classificada como de baixo custo e fácil aplicabilidade quando o processo não exige um resultado em curto prazo, uma vez que esse tipo de metodologia necessita de tempo para que haja uma eficácia considerável e que alcance os resultados esperados, o método da fitorremediação apresenta-se como uma boa opção econômica e ambiental.

O processo de fitorremediação é altamente utilizado para auxiliar no tratamento de áreas onde são destinados resíduos sólidos urbanos, esta técnica biotecnológica consiste em utilizar vegetais para remover, imobilizar ou tornar inofensivo contaminante orgânico ou inorgânico presentes no solo e na água. Quando comparada com técnicas tradicionais como bombeamento e tratamento, ou remoção física da camada contaminada, a fitorremediação tem sido considerada vantajosa, principalmente por sua eficiência na descontaminação e pelo baixo custo (Cunningham et al., 1996).

Segundo os autores Denison e Silbergeld (1998) a grande preocupação em tratar áreas destinadas a deposição de resíduos sólidos, são os metais pesados devido principalmente aos seus efeitos bioacumulativos no corpo humano, quando estes entram em contato direto ou indireto, sendo que a gravidade depende do grau de exposição aos mesmos. Dentre os efeitos adversos, apontam-se danos no sistema nervoso central, no sistema hepático, no sistema renal e no sistema esquelético.

A fitorremediação apresenta vantagens e limitações (Quadro 2), sendo que as espécies devem apresentar características desejáveis (Quadro 3), as quais naturalmente são difíceis de serem reunidas em uma única espécie. Desta maneira deve-se dar preferência aquelas que reúnem o maior número dessas características conforme Miller (1996) apud Pires (2003).

Quadro 2 - Vantagens e limitações da fitorremediação.

Vantagens	Limitações
Usado em grandes áreas, custo é 20 a 50% inferior quando comparado com os demais métodos de recuperação (Pereira, 2005)	Os metais devem estar acessíveis às planta (Anselmo et al., 2005)
Técnica passiva in situ (Medeiros, 2015)	Limitada a solos rasos ou onde a contaminação está localizada (< 5m) (Medeiros, 2015)
Redução do impacto ambiental e contribuição para a melhoria da paisagem (Medeiros, 2015)	Há pouco conhecimento sobre a agricultura, genética, reprodução e doenças de plantas fitorremediadoras (Medeiros, 2015)
As plantas ajudam na conservação do solo (Dinardi et al., 2003)	A concentração das toxinas devem estar dentro limites de tolerância da planta usada (Dinardi et al., 2003)
Produz a sua própria energia através da fotossíntese (Pereira, 2005).	Depende da atividade do elemento na solução do solo (Pereira, 2005).
Maior eficiência ao longo do tempo (Zeitouni, 2003)	Tratamento mais lento do que as técnicas físico- químicas tradicionais (Medeiros, 2015)
Boa aceitação pública (Dinardi et al 2003);	O tempo para despoluição satisfatória pode ser longo (Anselmo et al., 2005), sendo ineficiente para contaminantes fortemente adsorvidos (Zeitouni, 2003)
Plantas geneticamente modificadas promovem maior eficácia (Schroeder, 2003).	As plantas são seletivas aos metais, em altas concentrações a vegetação poderá não se desenvolver (Anselmo et al., 2005)
Pode fitorremediar mais de um poluente no mesmo local (Lamego, 2007)	A metabolização de compostos pode ser mais problemática do que os compostos originais. Podendo se propagar na cadeia alimentar (Dinardi et al., 2003)
Redução do escoamento superficial; da lixiviação e da mobilização de contaminantes no solo, além da redução na dispersão da poeira e de contaminantes pelo vento (Medeiros, 2015)	A contaminação pode se espalhar através da cadeia alimentar se as plantas acumuladoras forem ingeridas pelos animais. Se as plantas liberam compostos para aumentar a mobilidade dos metais, estes podem ser lixiviados para as águas subterrâneas (Medeiros, 2015)

Fonte: Autoria própria.

Quadro 3 - Características desejáveis das espécies fitorremediadoras.

Deverá ser capaz de secretar fitoquelatinas (Schroeder, 2003)
Resistência às pragas e doenças, apresentado boa acumulação mesmo em baixas quantidades (Wenger et al.,1997 Apud Accioly e Siqueira, 2000)
Facilidade na aquisição de propágulos, adaptabilidade, fácil erradicação ou colheita (Cruvinel, 2009)
Os metais pesados devem ser transportados para os galhos e folhas, facilitando sua remoção (Schroeder, 2003)

Fonte: Autoria própria.

Ainda segundo Savani (2016), as plantas fitorremediadoras devem possuir atributos como: 1) Deve possuir alta taxa de crescimento; 2) Alta taxa de biomassa; 3) Capacidade de absorção, concentração, metabolização e tolerância ao contaminante; 4) Para fitoextração, ter boa retenção do contaminante através das raízes; 5) Sistema radicular profundo e denso; 6) Ser de fácil colheita (quando for necessária a sua remoção); 7) Capacidade em se desenvolver bem em ambientes e climas diferenciados; 8) Possuir dados relatados na literatura, de ocorrência natural em ambientes poluídos; 9) Ser de fácil controle (evitando espécies “pragas”); 10) Ter resistência a doenças e/ou pragas; 11) Capacidade transpiratória elevada, em especial para árvores.

De acordo com seu mecanismo de tolerância, as plantas podem ser: exclusoras, quando a concentração do metal absorvido é mantida constante até que seja atingido o nível crítico no substrato; indicadoras, quando ocorre absorção passiva e as concentrações internas refletem os teores externos; e acumuladoras, que são capazes de manter níveis internos mais elevados que do substrato de cultivo (Simão & Siqueira, 2001; Accioly & Siqueira, 2000). Ainda de acordo com Accioly e Siqueira (2000) as plantas acumuladoras são próprias para fitoextração e exclusoras para fitoestabilização. As espécies de plantas superiores que

apresentam tolerância à metais pesados pertencem geral-mente às seguintes famílias: Caryophyllaceae, Cruciferae, Cyperaceae, Gramineae, Leguminosae e Chenopodiaceae. (Kabatas-Pendias & Pendias, 1992).

Alguns fatores devem ser observados para a utilização desta metodologia e na escolha de espécies fitorremediadoras, por exemplo características como a capacidade de extração de contaminantes e o seu potencial de crescimento, alta produção de biomassa, sistema radicular profundo e fácil controle (Leal et al., 2013), competitividade, vigor e tolerância a poluição (Lamego & Vidal, 2007).

A resistência das plantas aos íons de metais pesados pode ser obtida por um mecanismo em que a mesma o evita, o que inclui a imobilização do metal nas raízes e na parede celular. A tolerância aos metais pesados está baseada no seqüestro dos íons dos metais nos vacúolos, sua ligação com ligantes apropriados como os ácidos orgânicos, proteínas e peptídeos, e na presença de enzimas que podem funcionar a altos níveis de íons metálicos (Garbisu & Alkorta, 2001).

Contudo, a acumulação de metais pelas plantas também depende da natureza da planta e de fatores do solo, como pH, matéria orgânica, concentração, disponibilidade e solubilidade do metal, presença de ânions, textura, além de temperatura, luminosidade, umidade, presença de corretivos e fertilizantes, aeração, potencial redutor do solo e presença de micorrizas (Kabatas & Pendias, 1992); todos esses fatores podem influenciar direta ou indiretamente na absorção da planta.

Segundo o autor Moreno (2008) além de ser um método menos destrutivo e mais barato, a fitorremediação também oferece outros tipos de vantagens econômicas, como a possibilidade de negociação de créditos de carbono, já que a vegetação formada irá capturar dióxido de carbono do ar e o fixar em sua estrutura. Ainda de acordo com Moreno (2008) no caso dos metais, também é possível reaproveitá-los, pois, o mesmo será fitoextraído do solo, os metais de valor, como por exemplo o níquel, ficam retidos na estrutura das plantas, e poderão ser recuperados em processos de dissecação. E por fim, após a descontaminação da matéria vegetal, é possível usá-la como biocombustível em caldeiras. A prática eliminará quase que por completo os resíduos da remediação.

Diante das vantagens e limitações apresentadas, a fitorremediação está configurada da seguinte forma: fitodegradação, fitoestimulação, fitoestabilização, fitoextração, rizofiltração, fitovolatização e rizodegradação. Sendo que cada técnica listada apresenta consigo particularidades que restringe ou corrobora para seu uso dependendo das características onde deseja remediar levando em consideração ao contaminante presente na área (Pinheiro, 2017).

Métodos fitorremediadoras e suas características

Fitoextração

A fitoextração é um método ou tecnologia em constante desenvolvimento para tratamento de solos partindo da descontaminação do mesmo, em que consiste em atuar onde há presença de metais pesados (Leite et al., 2019). Ou seja, esse método tem finalidade de remediar por meio de determinadas plantas que através da acumulação de seus tecidos no solo contaminado, acarreta na extração dos agentes contaminantes presentes no solo sem que haja degradação ou comprometimento das características do próprio solo após seu tratamento (Mejía et al. 2014).

O método em que se fundamenta a fitoextração se dá por meio da impregnação dos agentes orgânicos que estão contaminando o solo, por meio das raízes das plantas, que armazenam e em seguida destinam os contaminantes para as partes aéreas da planta onde se acumulam. Como qualquer outro remediador, tal método visa a redução da presença de metais pesados em solos em tempo admissível (Vassão, 2019).

Para pôr em prática o método da fitoextração, é preciso usar plantas hiperacumuladoras, que são capazes de absorver e guardar elevado número de metais com menor produção de biomassa. Também podem ser usadas na fitoextração, plantas que produzem elevadas quantidades de biomassa, porém essas possuem menor capacidade para acumular metais (Nascimento et al., 2009).

Como vantagem tem a recuperação do material contaminante, caso este não seja tóxico e como desvantagem, sabe-se que as hiperacumuladoras têm crescimento lento, pouca biomassa e pouco sistema radicular; a biomassa sempre deve ser colhida e removida, sendo destinada corretamente; os metais absorvidos podem ter um efeito tóxico nas plantas (Epa, 2000, Gratão et al., 2005).

Fitoestabilização

De acordo com Leite et al. (2019), o método de fitoestabilização ou fitomobilização tem como finalidade impor um limite para a movimentação dos metais pesados presentes nos solos, usando como ferramenta de ação, a própria raiz da planta. Em outras palavras, sugere a utilização de plantas e suas raízes para impedir que o agente contaminante possa se locomover por meio dos agentes externos naturais como o vento, a chuva, a erosão, entre outros. O solo contaminado por metais pesados como o As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb e Zn, por exemplo, que é um tipo de metal que possui uma maior dificuldade de tratamento e eliminação, se torna mais viável mantê-lo estável no próprio local onde se encontra o contaminante. Assim, a ação das raízes de plantas na fitoestabilização, como o próprio nome já diz, é imprescindível para propagação do agente contaminante, evitando assim uma possível alteração nas propriedades químicas em determinados solos (Junior et al., 2016).

Com intuito de estabilizar os agentes contaminantes presentes no solo, antecipando as possíveis propagações por meio de erosão ou lixiviação, a fitoestabilização atua por meio da precipitação dos poluentes expostos na rizosfera através das ligações covalentes existentes que possuem caráter irreversível permite a conversão do poluente em outras formas biodisponíveis. Esse método também pode liberar O₂ e demais compostos, para promover a estagnação dos metais pesados na rizosfera (Rocha, 2016).

Possui como vantagem a revegetação e a recuperação do ecossistema, além de não ser necessária a remoção do solo nem colheita e remoção da biomassa. Como desvantagem, o contaminante permanece no local; sendo talvez necessária a fertilização e correção do solo; também é importante evitar que a planta transporte o metal para parte aérea; a zona de raiz e solo contaminado devem ser monitorados para controlar a solubilização e a lixiviação do contaminante; considera-se um processo intermediário de contenção (Vassilev et al., 2004).

Fitodegradação

A Fitodegradação ou fitotransformação é um método de fitorremediação que faz uso da ocorrência de degradação ou transformação de um certo tipo de composto orgânico atuantes no interior da planta, podendo ser citados, pesticidas, solventes, entre outros. Este mecanismo ocorre por meio dos processos metabólicos ocasionados devido a relação direta da absorção de contaminantes e ação de compostos enzimáticos liberados pelas raízes, com a ausência da atuação iminente dos microrganismos dispostos na rizosfera, promovendo assim, transformações internas das plantas para ações frente aos metais pesados (Pinheiro, 2017).

A fitodegradação e conseqüentemente o processo de mineralização consiste na ação promovida por enzimas específicas como a que promove a degradação de compostos nitroaromáticos, a degradação de solventes clorados e pesticidas, como citados acima (Medeiros, 2015). Ou seja, essa técnica possui a capacidade de promover a transferência de compostos orgânicos para outros destinos, ou melhor, podem ser realocados para outros tecidos das plantas em estado volatizados, acarretando em uma possível degradação variável que gera compostos menos tóxicos ligados diretamente aos a tecidos das plantas (Coutinho et al., 2015).

Apresenta como benefício ocorrer em ambientes livres de microrganismos, com alto índice de contaminantes tóxicos para a rizosfera. Como desvantagem apresenta a possibilidade de serem produzidos elementos tóxicos através da metabolização do poluente, podendo dificultar a identificação do processo metabólico e a comprovação da eliminação do elemento tóxico (Epa, 2000).

Fitovolatilização

Segundo Pinheiro (2017), o processo de fitovolatilização, possibilita a ação de microrganismos da rizosfera na diminuição do Hg (2) em Hg (0), sendo liberados para a atmosfera. Ou seja, os contaminantes liberados para a atmosfera no processo de fitovolatilização, não sofrem mudanças nas estruturas químicas e com isso os agentes contaminantes permanecem perigosos para o meio ambiente e conseqüentemente para a saúde humana. Os contaminantes retirados do solo pela fitovolatilização não são controlados como é comum nos outros processos de fitorremediação indicando a iminência que os demais se mudem para outras regiões sem serem notados. É importante frisar que alguns agentes contaminantes perigosos quando em contato com o ar, podem ser fixados em várias partes das plantas, ou seja, nas frutas e na madeira (Mejía et al., 2014).

Essa técnica apresenta a vantagem de transformar compostos em uma forma menos tóxica e após serem liberados na atmosfera pode sofrer uma degradação mais rápida do que no solo. No entanto, os elementos tóxicos podem ser liberados e o contaminante ou seu derivado pode acumular na vegetação causando, posteriormente, a transferência para os frutos, impactando a cadeia alimentar (Mariano & Okumura, 2012).

Rizofiltração

A rizofiltração pode ser conceituada como um método ou técnica que usa as plantas para concentrar por meio da absorção os agentes contaminantes de uma superfície aquosa como metais pesados ou elementos radioativos, por meio do sistema radicular (Preussler, 2014).

Tendo características semelhantes ao método de fitoextração, a rizofiltração é feita por meio de plantas que apresentam raízes com capacidade de desenvolvimento de um sistema radicular, sendo que a partir do contato das raízes a região inserida, as mesmas tornaram saturadas com os agentes contaminantes, onde as plantas podem ser substituídas constantemente e com isso manter a constante remediação (Souza, 2010).

Como desvantagem apresenta a necessidade constante da correção do pH da solução; as influências das reações químicas da raiz ainda precisam ser conhecidas; faz-se necessário um controle de fluxo de efluente para que o tratamento seja eficaz (Epa, 2000).

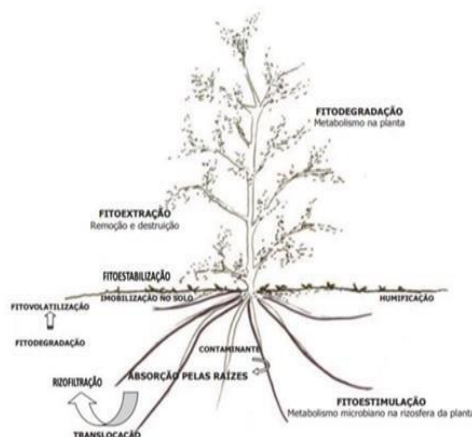
Rizodegradação ou Fitoestimulação

É o processo da perda de oxigênio através de raízes em volta da rizosfera, promovendo o surgimento e conseqüentemente o desenvolvimento de micro-organismos aeróbios (Preussler, 2014). Em outras palavras, esse método depende da presença de microrganismos que possibilitam a atividade biológica em volta das raízes das plantas, acarretando a iminência digestiva de substâncias, dando destaque às substâncias orgânicas (Mejía et al., 2014).

A execução da rizodegradação se dá por meio da liberação de compostos produzidos pelas plantas partindo da região superior do solo. Tais compostos têm a capacidade de remediação por meio da atividade dos microrganismos na rizosfera. Como exemplos, podem ser citados como remediadores compostos que contêm ácidos orgânicos, esteróis, nucleotídeos e enzimas (Souza, 2010).

Esse processo tem como vantagem, o fato de que a destruição do contaminante ocorre no local; não ocorre a absorção do contaminante pela planta; pode apresentar mineralização do contaminante; baixo custo de instalação e manutenção. Como desvantagem, o lento desenvolvimento da zona da raiz; a combinação com outras atividades da planta podem influenciar nos resultados; a planta necessita de fertilização adicional devido à competição por nutrientes dos microrganismos; a proliferação de microrganismos que não degradam pode ser estimulada; a fonte de carbono pode ser consumida no lugar do contaminante; e está limitada a profundidade da raiz (Mariano & Okumura, 2012). A Figura 11 demonstra de maneira simplificada como as diferentes técnicas da fitorremediação age.

Figura 11 - Exemplos de fitorremediação, mostrando partes da planta onde as diferentes técnicas ocorrem.



Fonte: Andrade et al. (2007).

Na percepção de Anselmo e Jones (2005) e Rahman et al. (2016), a taxonomia da fitorremediação depende da técnica a ser empregada, da natureza química ou das propriedades do poluente. Em síntese, no Quadro 4, ressaltam-se os processos utilizados pela fitorremediação e os potenciais efeitos para cada tipo de resíduos contaminantes do solo. É importante lembrar que a escolha do método de remediação mais apropriado depende das características do local, da concentração e dos tipos de poluentes a serem removidos, além do uso final do meio.

Quadro 4 - Resumo da Taxonomia de Fitorremediação.

Classificação	Potenciais Efeitos	Resíduos Contaminantes do Solo
Fitoextração	Absorção dos contaminantes pelas raízes, o armazenamento, transporte e acúmulo ocorre nas partes aéreas	Metais, compostos orgânicos e inorgânicos.
Fitoestabilização	Imobilização do contaminante por cobertura vegetal, lignificação ou humificação do contaminante no solo	Metais
Rizofiltração	Absorção e concentração do contaminante nos tecidos vegetais, utiliza plantas terrestres como mecanismo de absorção, concentração ou precipitação de contaminantes presentes em um meio aquoso.	Metais pesados, elementos radioativos
Fitodegradação	Os contaminantes são metabolizados por enzimas específicas dentro das células vegetais	Poluentes orgânicos
Fitoestimulação	Estimulação da biodegradação microbiana através dos exsudatos das raízes	Poluentes orgânicos
Fitovolatilização	Absorção e conversão do contaminante numa forma volátil, a qual é liberada na atmosfera	Metais pesados.

Fonte: Adaptado de Anselmo e Jones, 2005; Rahman et al. (2016)

Sistema de Bombeamento e Tratamento (Pump and Treat)

Uma maneira de remediação das águas subterrâneas contaminadas, in situ, é o sistema Pump and Treat (Bombeamento e Tratamento) que consiste no bombeamento das águas subterrâneas para a superfície, onde passa por um tratamento físico, químico ou biológico, até atingir o nível de descontaminação desejável (Tavares, 2013). Esta técnica é utilizada em alta escala no mercado apesar de seu alto custo, é considerado um dos únicos processos possíveis na contenção de plumas contaminadas a grandes profundidades (Quadro 5).

De acordo com Tavares (2009), o tempo de tratamento é grande devido à lentidão do processo de difusão, sendo também necessário o uso de enormes tanques de tratamento devido ao grande volume de água envolvido, tornando o processo bastante oneroso, em contrapartida permite o tratamento de solos saturados e aquíferos contaminados ao mesmo tempo. Aplica-se na remoção de compostos de hidrocarbonetos clorados (CHCs) e hidrocarbonetos monoaromáticos (BTEX).

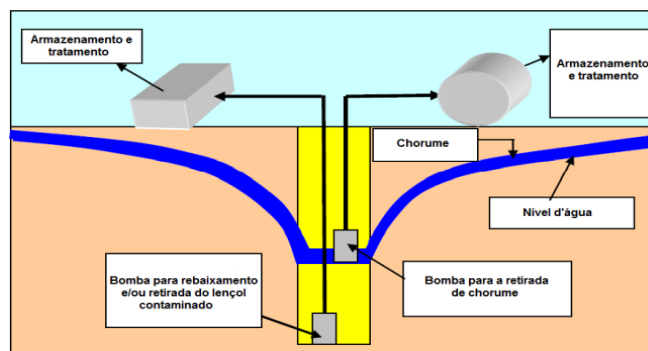
Quadro 5 - Principais vantagens e desvantagens da tecnologia Pump and Treat.

Vantagens	Desvantagens
Flexibilização do projeto: os poços podem ser adicionados posteriormente	Se a condutividade hidráulica é baixa e/ou a geologia local é complexa e heterogênea, a tecnologia pode não ser a mais adequada para descontaminação
Pode se usar a água tratada para recarga do aquífero	Custos elevados com operação, manutenção e com sistema de monitoramento.
Os custos para sua implantação são menores do que para a implantação de barreiras físicas	Requer uso de sofisticados modelos matemáticos para avaliar a sua eficiência
Pode ser utilizados os poços de extração para monitoramento da tecnologia	Requer tempos longos para atingir níveis de descontaminação aceitáveis
A água bombeada pode ser tratada por métodos já disponíveis para tratamento de efluentes	Geralmente a tecnologia só é eficiente quando utilizada em conjunto com outras
Evita a migração de plumas de contaminação dissolvidas na água subterrânea para áreas de abastecimento potável em rios, lagos, etc.	

Fonte: Adaptado de Santos, et al., (2000) apud Tavares (2013).

Esse sistema utiliza sistema provido de bombas (Figura 12), elétricas ou pneumáticas e pode ser composto por um poço com uma bomba simples que recupera água e contaminante ao mesmo tempo ou pode ser um sistema de duas bombas, uma rebaixando o nível d'água só retirando a água subterrânea e outra retirando o contaminante (Tavares, 2009). Ou seja, pode agir de duas maneiras, primeiramente, pode ser utilizado para captação das águas subterrâneas impactadas seguidas de tratamento adequado ou destinação final. Em paralelo, bombeia o lixiviado gerado para o tratamento previamente escolhido. O bombeamento e tratamento também podem ser utilizados como espécie de barreira de contenção (linha de poços de bombeamento conhecida como barreira hidráulica), que altera as condições hidrológicas do local, impedindo que a contaminação siga o fluxo subterrâneo natural (Salvador, 2012).

Figura 12 - Exemplo de um Sistema de Bombeamento e tratamento.



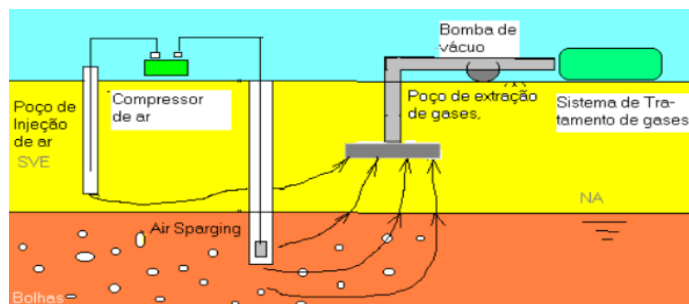
Fonte: Schmidt (2010).

Extração de Vapores do Solo – Soil Vapor Extraction (SVE)

A Extração de Vapor do Solo (SVE) é o sistema que utiliza a aplicação de vácuo na zona não saturada do solo para forçar a movimentação dos vapores em direção aos poços de extração, assim são retirados do solo compostos orgânicos voláteis (VOC)

e compostos orgânicos semivoláteis (SVOC), reduzindo o tempo de descontaminação (clean up), através do uso de poços de extração e injeção, de medidores de vazão, amostradores, compressores de ar e separadores de ar e água. O gás retirado passa por um tratamento para sua descontaminação se necessário, e então é liberado na atmosfera ou reintegrado ao solo (Tavares, 2013; Usepa, 1996 [b]). A Figura 13 apresenta o sistema de extração de vapor do solo de forma resumida.

Figura 13 - Sistema de extração de vapor do solo.



Fonte: <https://docplayer.com.br/32185851-Remediacao-de-areas-contaminadas-geotecnia-ambiental.html>

Os fatores que mais influenciam a utilização de SVE são: a permeabilidade do solo na zona não saturada, a umidade (altas umidades inviabilizam o processo), a profundidade do lençol freático e o tipo de contaminante. Essa técnica pode ser utilizada na descontaminação de solos com baixa à média permeabilidade, tendo seu funcionamento limitado se o nível d'água apresentar-se rasa (Salvador, 2012). As principais vantagens e desvantagens na utilização do SVE, estão descritas no Quadro 6.

Quadro 6 - Vantagens e desvantagens do sistema SVE.

Vantagens	Desvantagens
Alto custo-benefício	Aplicação restrita às zonas não saturadas
Desempenho comprovado	Baixa eficácia em solos de permeabilidade reduzida ou estratificados
Simplicidade na instalação e operação	baixa eficácia em solos estratificados
Grande capacidade de associação com outras tecnologias	pouca eficiência na extração de compostos orgânicos semi-voláteis
Uso com baixa perturbação no local da contaminação	

Fonte: EPA (1994).

Extração Multifásica - Multi-Phase Extraction (MPE)

O sistema de remediação por Extração Multifásica, também chamado de extração de fase dupla ou bioslurping, trata-se da combinação das técnicas de bioventilação e remoção de massa a vácuo, possibilitando a extração da fase livre, fase vapor, fase dissolvida na matriz do solo e estimulando o processo de biodegradação natural na zona não saturada (Nobre et al., 2003; Furtado, 2005).

A tecnologia de MPE consiste em processos combinados de remoção de massa a vácuo e de bioventilação, incitando na zona insaturada o processo de biodegradação natural e permitindo a extração das fases livres, dissolvidas e de vapor na matriz do solo. O bom desempenho da técnica na remoção das diferentes fases está relacionado a quantidade de vácuo aplicado e conseqüentemente ao gradiente de pressão. As fases líquidas e de vapor extraídas são remediadas e encaminhadas para disposição ou retornadas ao solo, de acordo com as normas ambientais (Usepa, 1999). O Quadro 7 apresenta as principais vantagens e desvantagens do sistema.

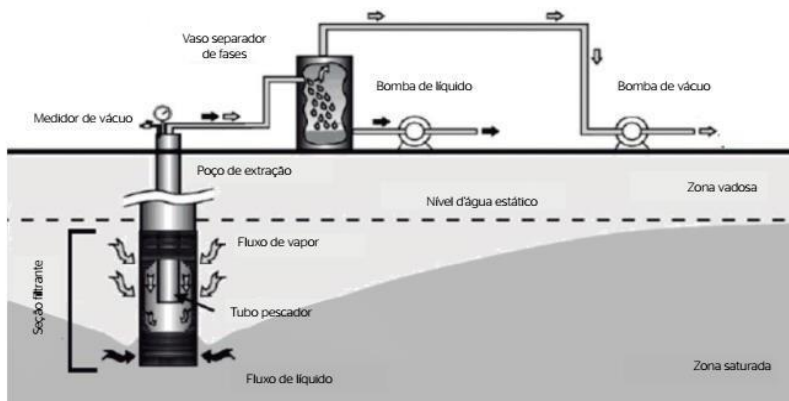
Quadro 7 - Vantagens e desvantagens do sistema MPE.

Vantagens	Desvantagens
Efetividade em solos de permeabilidade moderada a baixa	Requer bomba à vácuo ou soprador
Remoção efetiva de contaminantes em áreas de baixa permeabilidade, onde a única opção diferente para remediação envolva escavação	Requer técnicas de separação e tratamento de fases diversificadas
Remediação efetiva de contaminação em fase dissolvida, vapor, residual e não aquosa	Requer períodos de partida e períodos de ajustes mais longos do que verificados em bombeamentos convencionais
Aumento do raio de influência e da zona de captura de poços de extração	Custos mais elevados do que de bombeamentos convencionais
Aumento do total de fluidos recuperados, rebaixamento do nível d'água e espalhamento de LNAPL minimizados e transmissividade do aquífero maximizada	Limitações de profundidade para algumas configurações de MPE
Remediação efetiva da zona da franja capilar	
Remediação mais rápida do que verificada em bombeamentos tradicionais	

Fonte: EPA apud Verhnjak (2015).

A Figura 14 representa uma das configurações do sistema MPE (*single pump* ou *two phase extraction* (TPE)) na configuração *two phase extraction*, existe um único tubo pescador, posicionado acima do nível de água, que é utilizado para a extração simultânea da água subterrânea e dos vapores (Suthersan, 1996).

Figura 14 - Configuração do sistema de extração multifásica - two phase extraction.



Fonte: Adaptado de U.S. ARMY(1999).

Injeção de ar - Air Sparging

Utiliza a injeção de ar ou oxigênio na zona saturada do solo com o objetivo de promover uma espécie de "stripping" na água subterrânea e desprendendo os compostos orgânicos voláteis a serem captados em superfície. O Air Sparging geralmente é utilizado em conjunto com um sistema de Extração de Vapores (SVE), para onde os contaminantes são carregados (Furtado, 2005; Nobre & Nobre, 2005; Trovão, 2006).

O processo de remediação in-situ pode ser definido como uma injeção através de um compressor de ar a pressão e vazão controladas na zona saturada, causando o desprendimento dos contaminantes da água subterrânea, através da volatilização dos mesmos. As vantagens e desvantagens do sistema Air Sparging estão descritas no quadro abaixo.

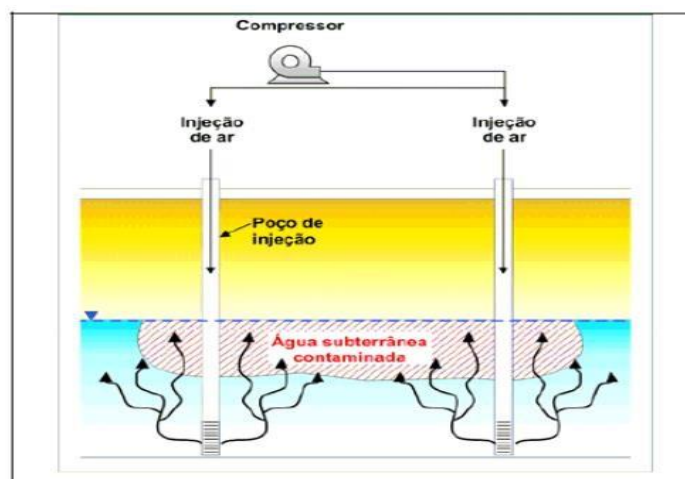
As principais características que determinam a eficiência do método são a permeabilidade gasosa na zona não saturada, taxa de fluxo d'água, permeabilidade do aquífero, volatilidade do contaminante e a sua solubilidade (Figura 15).

Quadro 8 - Vantagens e desvantagens do sistema Air Sparging.

Vantagens	Desvantagens
Simples de instalar	Não pode ser utilizado se existir fase livre
Não gera resíduos aquoso	Não pode ser utilizado em aquíferos confinados
Pode aumentar a efetividade da Extração de Vapores	Incerteza quanto às interações com processos físicos, químicos e biológicos ainda existem.
Baixo custo de operação	Potencial para induzir a migração dos contaminantes
	Requer testes piloto detalhados para garantir a não migração de vapores "off site"
	A injeção de ar deve ser projetada para condições específicas
	Tipos litológicos pouco permeáveis
	Profundidade da contaminação e do nível d'água local

Fonte: USEPA (2014).

Figura 15 - Sistema Air Sparging.



Fonte: Bechara (2004).

4. Considerações Finais

Perante ao que foi estudado até o momento, é possível perceber que a degradação de áreas causada pelo descarte inadequado de resíduos sólidos, ainda requer mais atenção e estudos, uma vez que pode ocasionar prejuízos à saúde pública e danos ao meio ambiente, gerando situações que acabam onerando diretamente ou não os cofres públicos. E uma vez considerado que não há barreiras de mitigação suficientes para evitar esse tipo de poluição, a ação corretiva surge através da remediação que consiste na aplicação de técnicas que isolem, atenuem ou eliminem o contaminante até alcançar concentrações recomendadas pelos órgãos de controle local.

Este estudo trata de um assunto que ainda está em forte expansão de mercado, logo é recorrente o surgimento de novos conceitos e aplicações, porém houve algumas limitações para a realização da pesquisa, tais como: escassez de trabalhos semelhantes realizados no Brasil, falta de pesquisas conclusivas que poderiam contribuir para uma maior abrangência do estudo.

O trabalho de recuperação de um lixão desativado pode perdurar por muitos anos, com necessidade de monitoramento contínuo de diversos índices, necessários para identificar eventuais falhas nos processos de recuperação. E, após constatada a eficiência dos processos utilizados, é possível dispor de uma nova área reabilitada para outros usos, podendo dispor, por exemplo, de equipamentos comunitários para utilização da população.

A recuperação de áreas degradadas por resíduos sólidos urbanos ou até mesmo uma eventual reabilitação que estabeleça novos usos da área para fins diversos deve sempre ser feita de forma multidisciplinar, somente com profissionais qualificados a fazer as investigações devidas e entendendo se os impactos da recuperação terão índices satisfatórios.

Referências e Bibliografia Consultada

- ABNT. (1985). NBR 8849/1985 Apresentação de projetos de aterroscontrolados de resíduos sólidos urbanos. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). <http://licenciadorambiental.com.br/wp-content/uploads/2015/01/Nbr8.849-NB-844-Apresentac%C3%A3o-de-Projetos-de-Aterros-Controlados-RSU.pdf>.
- ABNT. (1995). NBR 8419/1996. Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. ABNT. CB-2 – Comitê Brasileiro de Construção Civil. CE- 02:009.38 - Comissão de Estudo de Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). <http://licenciadorambiental.com.br/wp-content/uploads/2015/01/NBR-8.419-NB-843-Apresentac%C3%A3o-de-Projetos-de-Aterros-Sanitarios-RSU.pdf>.
- ABRELPE (2020). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. São Paulo. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE).
- Accioly, A. M. A. & Siqueira, J. O. (2000). Contaminação química e biorremediação do solo. In: Novais, R. F., Alvarez, V. H. & Schaefer, C. E. G. R. *Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- Alberte, E. P. V. (2003). *Análise de Técnicas de Recuperação de Áreas Degradadas por Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos: Lixões, Aterros Controlados e Aterros Sanitários*. Bahia – Brasil, Faculdade de Tecnologia e Ciências, Salvador.
- Alberte, E. P. V., Carneiro, A. P. & Kan, L. (2005). Recuperação de áreas degradadas por disposição de resíduos sólidos urbanos. *Diálogos & Ciência – Revista Eletrônica da Faculdade de Tecnologia e Ciências de Feira de Santana*, p. 2-15, jun. 2005.
- Almeida, D. S. (2000). *Recuperação Ambiental da Mata Atlântica*. Ilhéus: Editus.
- Almeida, P. S., Tada, A. M., Almeida, A.M.G., Gonçalo Jr., P. R. & Kimura, W. (2009). *Armazenamento de lixo urbano em lixões e aterros sanitários: contaminação do solo, proliferação de macro e micro vetores e contaminação do lençol freático*. Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo – USP.
- Alvarez, P. J. J., Illman, W. A. (2006). *Bioremediation and natural attenuation: process fundamentals and mathematical models*. New Jersey: Wiley-Interscience.
- Andrade, J. C. M. et al. (2007). *Fitorremediação: o uso de plantas na melhoria da qualidade ambiental*. Oficina de textos.
- Andrade, J. A., Augusto, F. & Jardim, I. C. S. F. (2010). Biorremediação de solos contaminados por petróleo e seus derivados. *Eclética Química*. 35(3).
- Andrews, G. & Noah, K. (1995). Design of Gas- Treatment Bioreactors. *Biotechnology progress*. 11(5), 498-509.
- Anselmo, A. L. F. & Jones, C. M. (2005). *Fitorremediação de solos contaminados – O estado da arte*. In: XXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção. ABEPRO.
- Araújo, C. S. (2014). Qualidade do solo da camada de cobertura final em área de disposição final de resíduos no semiárido tropical. 42 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) - Universidade Federal de Rio Grande do Norte, Natal.
- Assad, L. & Siqueira, T. (2016). Lixões continuam por toda parte. *Ciência e Cultura*. 68(2), 8-10.
- Azambuja, E. A. K., Philippi, D. A. & Pascale, M. A. (2015). Gestão dos resíduos sólidos urbanos: desafios e perspectivas para os gestores públicos. In: VII Seminários em Administração FEA – USP, 2005, São Paulo. Anais... São Paulo: Dep. Adm - USP, 2005. Disponível em: <http://www.ead.fea.usp.br/semead>. https://www.researchgate.net/publication/255662965_gestao_dos_residuos_solidos_urb_anos_desafios_e_perspectivas_para_os_gestores_publicos.
- Bento, F. M., Camargo, F. A. O. & Okeke, B. (2004). Bioremediation of soil contaminated by diesel oil. *Braz J Microbiol*. 34, 65-68.
- Beli, E. et al. (2005). Recuperação da área degradada pelo lixão Areia Branca de Espírito Santo o Pinhal. *Engenharia Ambiental*, Espírito Santo do Pinhal. 2(1), 140-1.
- Bitar, O. Y. & Braga, T. O. (1995). O meio físico na recuperação de áreas degradadas. In: Bitar, O. Y., (coord.). Curso de geologia aplicada ao meio ambiente. São Paulo: ABGE/IPT-Digeo, 1995. p.165-179. (Série Meio Ambiente).
- Braga, B., Hespanhol, I., Conejo, J. G. L., Barros, M. T. L., Spencer, M., Porto, M., Nucci, N., Juliano, N. & Eiger, S. (2016). *Introdução à Engenharia Ambiental*. Editora Prentice Hall.

- Brandt, Emanuel Manfred Freire. Biofiltração e biopercolação de metano presente em gases residuais gerados em processos anaeróbicos – 2016. xi, 196 f., enc.: il
- Brasil. (1981). Lei nº 6.938 de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Portal da Legislação: Leis ordinárias. 2014. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6938.htm.
- Brasil. (1988). Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 05 out. 1988.
- Brasil. (2000). Lei nº 9.985 de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Portal da Legislação: Leis ordinárias. 2014. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19985.htm.
- Brasil. (2010). Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF.
- Brasil; (2016). Plano Nacional dos Resíduos Sólidos. Brasília: Ministério do Meio Ambiente MMA/SBF. <http://www.mma.gov.br/pol%C3%ADtica-de-res%C3%ADduos-s%C3%B3lidos>.
- Belli Filho, P., Costa, R. H. R., Gonçalves, R. F., Coraucci Filho, B. & Lisboa, H. M. (2001).
- Tratamento de odores em sistemas de esgotos sanitários*. In: Prosab/Finep/Cnpq (Ed.). Pós tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. Segrac Editora e Gráfica.
- Calixto, B. (2015). Lixão que não acaba mais. *Revista Época*. <https://epoca.oglobo.globo.com/colunas-e-blogs/blog-do-planeta/noticia/2015/07/lixao-que-nao-acaba-mais.html>.
- Carponezzi, A. A., Costa, L. G. S., Kageyama, P. Y. & Castrp. C. F. A. (1990). Espécies pioneiras para recuperação de áreas degradadas: observação de laboratórios naturais. In: Congresso
- Florestal Brasileiro, 6., Campos do Jordão, SP. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura.
- CETESB. (2007a). Áreas contaminadas – etapas. Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental. http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas_contaminadas/etapas.asp.
- CETESB. (2007b). Áreas contaminadas – texto explicativo. Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental (CETESB). http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/areas-contaminadas/2011/texto_explicativo.pdf.
- CETESB. (2011). Áreas contaminadas – texto explicativo. Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental. (2011). <http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/areas-contaminadas/2011/texto-explicativo.pdf>.
- Coutinho, P., Cadorin, D., Noreto, L. & Gonçalves, Jr., A. (2015). Alternativas de remediação e descontaminação de solos: biorremediação e fitorremediação. *Nucleus (Online), Ituverava*. 12(1), 59-68. https://www.researchgate.net/publication/307816236_alternativas_de_remediacao_e_descontaminacao_de_solos_biorremediacao_e_fitorremediacao.
- Cuningham, S. D., Anderson, T. A. & Schwab, A. P. (1996). Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. *Adv. Agron.* 56, 55-114.
- Cruvinel, D. F. C. (2009). *Avaliação da fitorremediação em solos submetidos à contaminação com metais*. Dissertação (Mestrado). Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto
- Denison, R. & Silberg, E. (1998). Risk of municipal solid waste incineration on environmental perspective. *Risk Analysis*. 8(3), 343-55.
- Dinardi, A. L. et al. (2003). *Fitorremediação*. Centro Superior de Educação Tecnológica (CESET) – UNICAMP, Campinas. In: 3º Fórum de Estudos Contábeis. Faculdade integrada Claretiana, Rio Claro, São Paulo.
- Eco Clean Ambiental. (2026). Meio ambiente: você sabe a diferença entre lixão, aterro controlado e aterro sanitário? <http://www.ecocleanambiental.net.br/meioambiente.php>.
- Edwards, F. G. & Nirmalakhandan, N. (1996). Biological treatment of airstreams contaminated with VOCs: an overview. *Water Science and technology*. 34(3), 565-71.
- FRTR. (2026). *Treatment perspectives*. Federal Remediation Technologies Roundtable (FRTR). http://www.frtr.gov/matrix2/section3/sec3_int.html. Online
- Felipetto, A. V. M. (2007). Conceito, Planejamento e Oportunidades. Coordenação de Karin Segala. IBAM. In: Mecanismo de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos.
- Fernandes, F. M. & Alcântara, G. Z. (2022). *Biorremediação de solos – Estado da Arte*. <http://pt.scribd.com/doc/56616692/Contaminacao-de-solo-bioventilacao>.
- Ferreira, E. C. (2019). *Avaliação dos Métodos de Remediação de Solos Contaminados por Chorume*. TCC Engenharia Química - Universidade Federal Fluminense.

- FIEMG. (2011). Gerenciamento de Áreas Contaminadas – Conceitos e Informações Gerais. Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais (FIEMG).
- Florentino Santos, D. et al. (2011). O Meio Físico na Recuperação de Áreas Degradadas. *Revista da Ciência da Administração*, 4. Dez. 2011. <https://pt.scribd.com/document/496272673/o-Meio-Fisico-Na-Recuperacao-de-Areas-Degradadas-1>.
- FEAM. (1995). *Como destinar os resíduos sólidos urbanos*. Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM).
- FEAM. (2008). *Orientações técnicas para atendimento à deliberação Normativa 118/2008 do Conselho Estadual de Política*. (3ed). Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM).
- FEAM. (2010). *Caderno técnico de reabilitação de áreas degradadas por resíduos sólidos urbanos*. Fundação Israel Pinheiro. Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM).
- Furtado, M. (2005). Remediação de Solos. Para afastar o perigo que se esconde nos subterrâneos das grandes cidades, meios legais e econômicos devem fomentar obras de descontaminação. *Química e Derivados*. p.26-45.
- Galvão, M. C. B. & Ricarte, I. L. M. (2020). Revisão sistemática da literatura: conceituação, produção e Publicação. *LOGEION: Filosofia da informação*. 6(1), 57-73. <https://sites.usp.br/dms/wp-content/uploads/sites/575/2019/12/Revis%C3%A3o-Sistem%C3%A1tica-de-Literatura.pdf>.
- Gaylarde, C. C., Bellinaso, M. D. L. & Manfio, G. P. (2005). Aspectos biológicos e técnicos da biorremediação de xenobióticos. *Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento*, (34). https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4144372/mod_resource/content/1/Biorremediacao%CC%A7a%CC%83o%20-%20Artigo%201.pdf.
- Garbisu, C. & Aalkorta, I. (2001). Phytoextraction a cost effective plant-based technology for the removal of metals from the environment. *Bioresour Technology*. LSL. 77, 229-36.
- Gebert, J. & Grönröft, A. (2006). Performance of a passively vented field-scale biofilter for the microbial oxidation of landfill methane. *Waste Management*. 26(4), 399-407.
- Girard, M., Ramirez, A. A., Buelna, G. & Heitz, M. (2011). Biofiltration of methane at low concentrations representative of the piggery industry—influence of the methane and nitrogen concentrations. *Chemical Engineering Journal*. 168(1), 151-8.
- Gouveia, N. (2012). Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. *Ciência & Saúde Coletiva*, 17(6), 1503-1510.
- Gratão, P. L. et al. (2005). Phytoremediation: green technology for the clean up of toxic metals in the environment. *Brazilian Journal of Plant Physiology*. 17(1), 53- 64.
- IBAM. (2001). *Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos*. Rio de Janeiro: IBAM. <http://www.resol.com.br/cartilha4/manual.pdf>.
- IPT. (2005) apud Secretaria do Meio Ambiente de São Paulo. Teoria e Prática em Recuperação de Áreas Degradadas: Plantando a semente de um mundo melhor. FEHIDRO. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT).
- Junior, J. L. M., Oliveira, L. H., Dias, L. R. S., Murakami, N. M. & Martins, T. J. J. P. (2016). *Fitorremediação de águas contaminadas com agroquímicos*. Orientador: Cleder Alexandre Somensi. 23 p. Trabalho de Defesa do Projeto Integrador (Técnico em Química) - Instituto Federal Catarinense, ARAQUARI/SC. <http://quimica.araquari.ifc.edu.br/wp-content/uploads/sites/20/2018/12/TRABALHO-FINALFITORREMEDIA%C3%87%C3%83O-DE-%C3%81GUAS-CONTAMINADAS-COMAGROQU%C3%8DMICOS.pdf>.
- Kabata, A. & Pendias, H. (1992). *Trace elements in soil and plants*. (2ed). Boca Raton: CRC Press.
- Kennes, C. & Veiga, M. C. (2001). *Bioreactors for waste gas treatment*. Kluwer Academic Publishers..
- Kennes, C., Rene, E. R. & Veiga, M. C. (2009a). Bioprocesses for air pollution control. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 84(10), 1419-36.
- Kennes, C., Montes, M., López, M. E. & Veiga, M. C. (2009b). Waste gas treatment in bioreactors: environmental engineering aspects This article is one of a selection of papers published in this Special Issue on Biological Air Treatment. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 36(12), 1887-94.
- Lacerda, F. (2019). *Biorremediação: educação em saúde e alternativas à poluição ambiental*. Natal: IFRN.
- Lanza, V. V. (2009). *Cadernos técnicos de reabilitação de áreas degradadas por resíduos sólidos urbanos*. Fundação Estadual do Meio Ambiente. Belo Horizonte. 28 p.
- Lamego, F. P. & Vidal, R. A. (2007). Fitorremediação: plantas como agentes de despoluição? Pesticidas: *Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente*. 17. <https://revistas.ufpr.br/pesticidas/article/view/10662>.
- Leal, E. F. et al. (2013). *Fitorremediação de chumbo pelas espécies Vetiver (Vetiveria zizanioides L), Feijão de porco (Canavalia ensiformis L.), e Singônio (Syngonium angustatum*. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. 36., 2013, Florianópolis. Anais. Florianópolis, 2013. p. 1 - 4. <http://eventosolos.org.br/cbcs2013/anais/arquivos/2760.pdf>.
- Leite, M., Guajajara, E. P. V., Silva, S., Da Silva, W. L. & Dos Santos, S. C. (2019). Fitorremediação de Solo Contaminado por Metais Pesados. *Cadernos de Prospecção*, Salvador. 12(2), 327-35. DOI <https://dx.doi.org/10.9771/cp.v12n2p327>. <https://portalseer.ufba.br/index.php/ni/article/view/27308/17047>.

- Lima, D. F. (2010). *Biorremediação em sedimentos impactados por petróleo na baía de todos os santos, bahia: avaliação da degradação de hidrocarbonetos saturados*. Salvador : UFB. 234p. Tese (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2010.
- Lima, L. M. Q. (2002). *Biorremediação de Lixões– Biotecnologia Aplicada ao Meio Ambiente*. 278 pg. SINDBIO.
- Lima, L. M. Q. (2004). *Lixo, tratamento e biorremediação*. Editora Hemus.
- Macedo, J. A. B. (2000). Programa de bioaumentação, uma tecnologia avançada para tratamento de efluentes laticínios. *Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes*. 55(315), 47-52.
- Malik, N. & Biswas, A. K. (2012). Role of Higher Plants in Remediation of Metal Contaminated Sites. *Scientific Reviews and Chemical Communications*. 2(14), 146
- Monteiro, J. H. P. et al. (2001). *Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos*. IBAM.
- Mariano, D. C. & Okumura, R. S. (2012). Aspectos agronômicos, uso pelo homem e mecanismos da fitorremediação: uma revisão. *Rama - Revista em Agronomia e Meio Ambiente*. 5(2), 85-101,
- Marinho, A. P. F. et al. (2019). *Contaminação do solo por zinco, cobre e bário em área de disposição irregular de resíduos sólidos urbanos no semiárido potiguar*. São Paulo: ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental.
- Marques, R. (2012). *Políticas públicas e gestão de resíduos sólidos em Goioerê-PR*. Monografia (Pós Graduação em Gestão Pública Municipal). Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- Martins, A. P. R., Dinardi, A. L., Formagi, V. M., Opes, T. A., Barros, R., Cneglian, C. M. R., Brito, N. N., Dragoni, S. G. & Tonso, S. (2003). *Biorremediação*. In: III Fórum de Estudos Contábeis, 2003, Rio Claro. III Fórum de Estudos Contábeis.
- McNevin, D. & Barford, J. (2000). Biofiltration as an odour abatement strategy. *Biochemical Engineering Journal*, 5, 231-42.
- Medeiros, T. A. M. (2015). *Efeito fitotóxico e potencial remediador de três espécies vegetais contaminadas com benzeno*. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Campus Experimental de Sorocaba. Efeito fitotóxico e potencial remediador de três espécies vegetais contaminadas com benzeno (unesp.br)
- Mejía, P. V. L. et al. (2014). Metodologia para seleção de Fitorremediação em Áreas Contaminadas. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*. (31), 97-104. http://www.abes-dn.org.br/publicacoes/rbciamb/PDFs/31-12_Materia_10_artigos395.pdf.
- Melse, R. W. & Van der Werf, A. W. (2005). Biofiltration for mitigation of methane emission from animal husbandry. *Environmental Science & Technology*. 39(14), 5460-8.
- Mohr, H. & Schpfer, P. (1995). *Plant physiology*. Berlin: Sprenger-Verlag.
- Monteiro, M. T. (2008). *Fitorremediação de rejeito contaminado proveniente do Canal do Fundão, na Baía de Guanabara-RJ*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Moreno, F. N. (2008). *Fitorremediação: Plantas nativas podem recuperar solos poluídos*. São Paulo, 2008. <http://www.ecodebate.com.br/index.php/2008/04/28/fitorremediacao-plantas-nativas-podem-recuperar-solospoluidos/>.
- Motta, R. S. & Sayago, D. E. (1998). *Propostas de Instrumentos Econômicos Ambientais para Redução do Lixo Urbano e o Reaproveitamento de Sucatas no Brasil*. Rio de Janeiro, 1998.
- Nikiema, J., Brzezinski, R. & Heitz, M. (2007). Elimination of methane generated from landfills by biofiltration: a review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 6(4), 261-84.
- Nobre, M. M. (2003). *Remediação de Solos - Revista Química e Derivados*. <http://www.quimicaederivados.htm>.
- Nobre, M. M. & Nobre, C. M. (2005). Remediação de Solos. Técnicas alternativas melhoram desempenho. *Química e Derivados*. (417).
- Noyola, A., Morgan-Sagastume, J. M. & Lopez-Hernandez, J. E. (2006). Treatment of biogás produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odor control and energy/resource recovery. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 5(1), 93-114.
- Oliveira, L. F. C. et al. (2013). Sorção e mobilidade do lítio em solos de áreas de disposição final de resíduos sólidos urbanos. *Engenharia Sanitária e Ambiental* 18, 139-48.
- Park, S., Lee, C-H., Ryu, C-R. & Sung, K. (2009). Biofiltration for reducing methane emissions from modern sanitary landfills at the low methane generation stage. *Water, air, and soil pollution*. 196(1-4), 19-27.
- Pelczar, M. J. J., Chan, E. C. S. & Krieg, N. R. (1997). *Microbiologia*. Conceitos e Aplicações. Volume 2/ (2ed). Editora Pearson Education do Brasil.
- Pereira, B. F. (2005). *Potencial fitorremediador das culturas de feijão-de-porco, girassol e milho cultivadas em latossolo vermelho contaminado com chumbo*. Instituto agrônomo, 68 p. 2005.

- Pereira, T. C. G. (2011). *Política Nacional de Resíduos Sólidos: nova regulamentação para um velho problema*. *Direito e Justiça*. 11(17).
- Pereira, A. S. et al. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. [Free ebook]. Santa Maria. Editora da UFSM.
- Pinheiro, M. B. (2017). *Plantas para infraestrutura verde e o papel da vegetação no tratamento das águas urbanas de São Paulo: identificação de critérios para seleção de espécies*. 2017. Dissertação (Mestrado em Paisagem e Ambiente) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. doi:10.11606/D.16.2017.tde27062017-14195.
- Preussler, K. H. (2014). Avaliação de um sistema de wetlands no tratamento de lixiviado de aterro. Orientador: Cláudio Fernando Mahler. 119 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. <http://www.coc.ufri.br/pt/documents2/doutorado/2014-1/2554-karla-heloise-preusslerdoutorad>.
- Rahman, M. A. et al. (2016). *Phytoremediation of Toxic Metals in Soils and Wetlands: Concepts and Applications*. In: Rahman, M. A. et al. *Environmental Remediation Technologies for Metal Contaminated Soil*. Springer Japan, 2016. p. 161-95.
- Resende, L. A. et al. (2013). *Fertilidade do solo em aterro controlado e sua influência na sobrevivência de espécies arbóreas em diferentes modelos de plantio*. In: Jornada Científica e Tecnológica, 5. Inconfidentes. Anais... Inconfidentes: Ifsuldeminas. p 287-98.
- Resende, L. A. et al. (2015). Crescimento e sobrevivência de espécies arbóreas em diferentes modelos de plantio na recuperação de área degradada por disposição de resíduos sólidos urbanos. *Revista Árvore*. 39, 147-57.
- Risemberg, R. I. C. et al. (2026). A importância da metodologia científica no desenvolvimento de artigos científicos. *E-Acadêmica*, 7(1), e0171675. <https://eacademica.org/eacademica/article/view/675>.
- Rocha, L. S. M. (2016). *Fitorremediação de solo contaminado com Diclosulam utilizando Mucuna Aterrima, Crotalaria Juncea, Crotalaria Spectabilis*. Orientador: Prof. Me. Alisson José Eufrásio de Carvalho. 2016. 32 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) - Instituto Federal de Minas Gerais, São João Evangelista. https://www.sje.ifmg.edu.br/portal/images/artigos/biblioteca/tccs/agronomia/2016/lanna_shanyelle_moreira_rocha.pdf.
- Rodrigues, P. & Orlandelli, R. (2018). Plantas como Ferramentas para a Remediação Ambiental: uma Revisão da Literatura. *Uniciências*. 22(1), 42-38. DOI: 10.17921/1415-5141.2018v22n1p38-44. <https://revista.pgsskron.com/index.php/uniciencias/article/view/5458>.
- Romeiro, C. E., Souza, C. E. & Lopes, F. V. (2014). *Discussões sobre a recuperação de áreas degradadas por resíduos sólidos urbanos*. In: I Simpósio Mineiro de Geografia. Alfenas 2014. Anais... Minas Gerais. ISBN: 978-85-99907-05-4.
- Salvador, F. L. R. (2012). *Análise das etapas de um plano de recuperação de área degradada (prad) aplicada para um antigo lixão no município de Garopaba*. TCC (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Tecnológico. Engenharia Sanitária e Ambiental.
- Sampaio, R. F. & Mancini, M. C. (2006). Estudos de revisão sistemática: Um guia para síntese criteriosa de evidência científica. *Revista Brasileira de Fisioterapia*, 11(1), 83-9.
- Santos, G. O. (2012). *Avaliação do cultivo de gramíneas na superfície de aterro sanitário, com ênfase para a redução da emissão de metano e dióxido de carbono para a atmosfera*. 313 p. Tese (Doutorado em Saneamento Ambiental) — Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Ambiental. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Savani, F. R. (2016). *Avaliação de feijão de porco (canavalia ensiformis) como fitorremediador de Pb, Cu e Zn em solos*. 74 f. Profª Dr.ª Luísa Helena Dos Santos Oliveira (Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Federal do ABC, Santo André-SP. <http://propg.ufabc.edu.br/cta/wpcontent/uploads/2019/12/CTA-2016-Fabiana-Ramos-Savani.pdf>.
- Scalvenzi, M. N. R. L. (2017). Petroleum Degradation: Promising Biotechnological Tools for Bioremediation. <https://www.intechopen.com/chapters/56439>.
- Schmidt, C. A. B. (2010). *Recursos Hídricos e Saneamento*. ANO I – 2010 - Volume 1, 62p.
- Schroeder, J. (2003). *Plantas poderão limpar áreas contaminadas com metais pesados*. Universidade da Califórnia/EUA. <https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010160030829&id=010160030829>.
- Simão, J. B. P. & Siqueira, J. O. (2001). Solos contaminados por metais pesados: características, implicações e remediação. *Informe Agropecuário*. 22(210), 18-26.
- Sissino, C. L. S. & Oliveira, R. M. (2000). *Resíduos Sólidos, ambiente e saúde: uma visão multidisciplinar*. Rio de Janeiro: Fiocruz.
- Sly, L. I., Bryant, L. J., Cox, J. M. & Anderson, J. M. (1993). Development of a biofilter for the removal of methane from a coal mine ventilation atmospheres. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 39, 400-4.
- Souza, C. M. (2007). *Recuperação de áreas degradadas em aterros sanitários*. 51 p. — Monografia (Graduação em Engenharia Florestal), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- Souza, M. R. F. (2010). *Fitorremediação de solo contaminado por Metais Pesados*. Orientador: Profª. Marina Neiva Alvim. 30 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Ciências Biológicas) - Universitário Metodista Izabela Hendrix, Belo Horizonte - MG, 2010. <https://www.metodista.br/revistas/revistasizabela/index.php/aic/article/viewFile/536/443>

- Souza, E. G., Nunes, A. S., Trindade, D. B., Pontes, M. P., Castro e Silva, A. & Soares, E. P. (2011). Crescimento radial de fungos amazônicos em meio de cultivo suplementado com corante azul de metileno. In: 51º Congresso Brasileiro de Química. São Luiz- MA.
- Stein, V., Hettiaratchi, J. & Achari, G. (2001). Numerical model for biological oxidation and migration of methane in soils. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*. 5(4), 225-34.
- Stein, V. B., Hettiaratchi, J. P. A. (2001). Methane oxidation in three Alberta soils: influence of soil parameters and methane flux rates. *Journal of Environmental Technology*. 22, 101-11.
- Stern, J. C., Chanton, J., Abichu, T., Powelson, D., Yuan, L., Escoriza, S. & Bogner, J. (2007). Use of a biologically active cover to reduce landfill methane emissions and enhance methane oxidation. *Waste Management*. 27(9), 1248-58.
- Suthersan, S. S. (1996). *Remediation engineering: design concepts* Geraghty & Miller Environmental Science and Engineering Series. Boca Raton: Lewis.
- Syed, M., Soreanu, G., Falletta, P. & Béland, M. (2006). Removal of hydrogen sulfide from gas streams using biological processes - A review. *Canadian Biosystems Engineering*. 48(1), 2.1 - 2.14.
- Tavares, S. R. L. (2009). *Fitorremediação em solo e água de áreas contaminadas por metais pesados provenientes da disposição de resíduos perigosos*/ Sílvio Roberto de Lucena Tavares. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE.
- Tavares, S. R. L. (2013). *Remediação de solos e águas contaminadas por metais pesados: Conceitos básicos e fundamentos*. Editora Clube de Autores.
- Trovão, R. S. (2006). *Análise ambiental de solos e águas subterrâneas contaminadas com gasolina: estudo de caso no município de Guarulhos, São Paulo*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mineral. USP.
- EPA. (2000). Introduction to Phytoremediation. United States Environmental Protection Agency (EPA) <https://www.epa.gov/nscep>.
- UFBA. (1998). Relatório Técnico: 2ª etapa do projeto de pesquisa aproveitamento de resíduos sólidos para a produção de materiais de construção de baixo custo. Salvador. Universidade Federal da Bahia (UFBA).
- U.S. ARMY. (1999) *Multi-phase extraction - Engineering and design*: EM 1110-1-4010. Washington, D.C.: US Army.
- USEPA. (2026). *Landfarming*. In: How To Evaluate Alternative Cleanup Technologies For Underground Storage Tank Sites: A Guide For Corrective Action Plan Reviews. United States Environmental Protection Agency (USEPA). <http://www.epa.gov/oust/cat/landfarm.htm>.
- USEPA. (2018). *Soil Vapor Extraction*. In: *How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites – a guide for corrective action plan reviewers*. Washington, 1994. Chapter 2, p.II-1 – II-31. EPA-510-R04-002. United States Environmental Protection Agency (USEPA). <https://www.epa.gov/ust/how-evaluate-alternative-cleanup-technologies-underground-storage-tank-sites-guide-corrective>.
- USEPA. (1996). *A Citizen's Guide to In situ Flushing*. 1996, 4pp. EPA 542-F-01-007. United States Environmental Protection Agency (USEPA). <http://clu-in.org/download/citizens/citsve.pdf>.
- USEPA. (1999). *Office of Underground Storage Tanks, Markets and Technology Trends*. EPA-510- B99-007, United States Environmental Protection Agency (USEPA).
- USEPA. (2014). *Light Non-Aqueous Phase Liquids LNAP* (2014). United States Environmental Protection Agency (USEPA).
- Vassão, C. B. (2019). *Potencial de gramíneas (poaceae) como fitorremediadoras em solo contaminado com herbicida*. Orientador: Prof. Drª. Ana Maria Conte. 45 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual do Norte do Paraná, Bandeirantes-PR. <https://uenp.edu.br/dissertacao-agronomia/13474-catharina-bertollinivassao/file>.
- Vassilev, A. et al. (2004). *The use of Plants for Remediation of Metal-contaminated Soils*. *The Scientific World Journal*. 16(4), 9-34.
- Veillette, M., Girard, M., Viens, P., Brzezinski, R. & Heitz, M. (2012). Function and limits of biofilters for the removal of methane in exhaust gases from the pig industry. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 94(3), 601-11.
- Verhujak, M. S. S. (2015). *Avaliação da eficiência da técnica de remediação de solo contaminado por hidrocarbonetos*. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia de Bauru.
- WEF. (2004). *Control of odors and emissions from wastewater treatment plants*. Manual of Practice 25. 1 ed. Alexandria: Water Environment Federation, 2004. 566 p.
- Wu, G., Chabot, C., Caron, J. J. & Heitz, M. (1998). Biological elimination of volatile organic compounds from waste gases in a biofilter. *Water Air and Soil Pollution*, 101, 69-78.
- Zeitouni, C. F. (2003). *Eficiência de espécies vegetais como fitoextratoras de cádmio, chumbo, cobre, níquel e zinco de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico*. 91p. Dissertação (Mestrado). Instituto Agrônomo - Agricultura Tropical e Subtropical [s.l].