

## **Técnicas de biorremediação: uma visão geral dos processos mais eficazes**

*Bioremediation techniques: an Overview of the most effective processes*

*Técnicas de biorremediación: una descripción general de los procesos más efectivos*

### **Sérgio Marques Costa**

Professor Doutor, UNOESTE, Brasil.  
sergiocosta@unoeste.br

### **Hélida Regina Sala**

Doutoranda PPGMADRE, UNOESTE, Brasil.  
helidahrs@hotmail.com

### **Daniele Silva Sukert**

Mestranda PPGAGRO, UNOESTE, Brasil.  
danielesukert@hotmail.com

### **Bruna Oliveira Reinheimer Spolaor**

Doutoranda PPGAGRO, UNOESTE, Brasil.  
brunaspolaor@hotmail.com

### **Maíra Rodrigues Uliana**

Professora Doutora, UNOESTE, Brasil.  
maira@unoeste.br

**RESUMO**

Devido a crescente preocupação com os problemas ambientais novas pesquisas estão sendo voltadas para soluções sustentáveis e inovadoras. A biorremediação, que busca solucionar a contaminação do solo de maneira ecologicamente responsável, abrange diversas técnicas de biorremediação disponíveis, cada uma com suas vantagens e desafios. A biorremediação in situ envolve a remoção de poluentes no próprio local de contaminação, sem a necessidade de remoção do solo. Isso pode ser alcançado por meio de técnicas como atenuação natural, bioestimulação, landfarming, fitorremediação e bioaugmentação. Já a biorremediação ex situ envolve a remoção do solo contaminado para tratamento em outro local, utilizando técnicas como compostagem e biorreatores. Esta revisão investiga e detalha cada técnica de biorremediação já existentes, suas funções e resultados de suas aplicações. Concluímos que a biorremediação é uma solução prática e sustentável, mas seu sucesso depende de fatores como localização, clima, organismos e monitoramento adequado. Combinar técnicas pode aumentar a eficácia na remoção de poluentes. No entanto, é essencial desenvolver estratégias para reduzir o uso de contaminantes, já que os resíduos persistem no ambiente após a biorremediação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Resíduos. Tecnologias Limpas. Remediação de poluentes.

**ABSTRACT**

*Due to growing concern about environmental problems, new research is being focused on sustainable and innovative solutions. Bioremediation, which seeks to resolve soil contamination in an ecologically responsible manner, encompasses several available bioremediation techniques, each with its own advantages and challenges. In situ bioremediation involves removing pollutants at the site of contamination, without the need to remove soil. This can be achieved through techniques such as natural attenuation, biostimulation, landfarming, phytoremediation and bioaugmentation. Ex situ bioremediation involves removing contaminated soil for treatment elsewhere, using techniques such as composting and bioreactors. This review investigates and details each existing bioremediation technique, its functions and results of its applications. We conclude that bioremediation is a practical and sustainable solution, but its success depends on factors such as location, climate, organisms and adequate monitoring. Combining techniques can increase effectiveness in removing pollutants. However, it is essential to develop strategies to reduce the use of contaminants, as residues persist in the environment after bioremediation.*

**KEYWORDS:** Waste. Clean Technologies. Pollutant remediation.

**RESUMEN**

*Debido a la creciente preocupación por los problemas medioambientales, se están centrando nuevas investigaciones en soluciones sostenibles e innovadoras. La biorremediación, que busca resolver la contaminación del suelo de una manera ecológicamente responsable, abarca varias técnicas de biorremediación disponibles, cada una con sus propias ventajas y desafíos. La biorremediación in situ implica la eliminación de contaminantes en el lugar de la contaminación, sin necesidad de eliminar el suelo. Esto se puede lograr mediante técnicas como la atenuación natural, la bioestimulación, el landfarming, la fitorremediación y la bioaugmentación. La biorremediación ex situ implica retirar el suelo contaminado para tratarlo en otros lugares, utilizando técnicas como el compostaje y los biorreactores. Esta revisión investiga y detalla cada técnica de biorremediación existente, sus funciones y resultados de sus aplicaciones. Concluimos que la biorremediación es una solución práctica y sostenible, pero su éxito depende de factores como la ubicación, el clima, los organismos y el monitoreo adecuado. La combinación de técnicas puede aumentar la eficacia en la eliminación de contaminantes. Sin embargo, es fundamental desarrollar estrategias para reducir el uso de contaminantes, ya que los residuos persisten en el medio ambiente después de la biorremediación.*

**PALABRAS CLAVE:** Residuos. Tecnologías limpias. Remediación de contaminantes.

## 1 INTRODUÇÃO

A preocupação com os problemas ambientais abriu portas para pesquisas de cunho sustentável, formando redes colaborativas e geradoras de soluções com foco em tecnologias inovadoras, sustentáveis e viáveis. Existem diferentes técnicas de remediação de poluentes no solo, tais como o revestimento de superfície, encapsulamento, vazamento, lavagem do solo, extração eletro-cinética, estabilização, solidificação, vitrificação, fitorremediação e biorremediação (SILVA; FERNANDES, 2021). Essas tecnologias dependem das características do solo, da água, dos contaminantes, da eficácia esperada, da viabilidade técnica e econômica, do tempo de implementação e tempo de efeito (MISHRA; SINGH; ARORA, 2017). Levanto em consideração esses fatores, as tecnologias mais favoráveis ao meio ambiente são as de biorremediação, podendo utilizar fungos, bactérias, microalgas, compostagem e espécies de plantas tolerantes a metais pesados.

A utilização de fungos é uma dessas alternativas, pois apresentam uma grande capacidade de adaptação à presença de metais pesados no solo. Estes organismos podem reduzir a absorção de metais pesados, promovendo a precipitação ou quelação de elementos na rizosfera, causando alterações morfológicas, fisiológicas e moleculares nas plantas hospedeiras (ZHANG *et al.*, 2019).

Estudos aprofundados sobre as características dos microrganismos são importantes para a biorremediação, principalmente no caso das bactérias, que já foram descritas como favoráveis em reações de bioacumulação e transformação do metal em derivados menos tóxicos ou inócuos, necessitando apenas que não sejam utilizadas espécies patogênicas no ambiente (GIOVANELLA *et al.*, 2016).

Outro grupo de microrganismo diversificado, de maioria microscópico e aquáticos, as microalgas, são grandemente associadas com estações de tratamento de esgotos (DIAS *et al.*, 2019). Elas são capazes de atingir a biorremediação de forma eficiente por meio da bioassimilação e biossorção. Considerando condições de crescimento, estrutura celular e pré-tratamento, o desenvolvimento de uma biomassa à base de microalgas é uma tecnologia de baixo custo, mas com alto potencial de biorremediação para neutralizar e adsorver íons de metais pesados (SREEKUMAR; UDAYAN; SRINIVASAN, 2020).

Além do uso de microrganismo biorremediadores, existem algumas práticas agronômicas consideradas como tecnologias limpas que podem ser viáveis para aplicação em solos contaminados, como por exemplo a adição de calcário, que devido a uma cadeia de reações aumenta a concentração de hidroxilas que reagem com o cobre e diminuem sua toxicidade, principalmente nas raízes (BRUNETTO *et al.*, 2017).

Outra técnica é o uso de fertilizantes silicatos que têm sido estudados pelo efeito de redução da mobilidade de metais por meio das mudanças do pH do solo e aumento a tolerância das plantas à toxicidade de Mn, Fe, Cd e Zn. Culturas de cobertura cultivadas em linha e entrelinha de vinhedos e pomares com altos teores de metais pesados podem diminuir sua disponibilidade através da absorção e compartimentalização no apoplasto de raízes ou organelas, como o vacúolo (RAMALHO; AMARAL SOBRINHO; VELLOSO, 1999).

Sendo assim o objetivo deste estudo foi de realizar uma revisão bibliográfica sobre as técnicas de biorremediação existentes, suas funções e os resultados esperados.

## 2 MÉTODOS

Trata-se de uma revisão integrativa da literatura, realizada durante os meses de setembro e outubro de 2023, nas bibliotecas virtuais Scopus, Scielo e Google Acadêmico. Os termos utilizados foram: biorremediação, biorremediação *in situ*, biorremediação *ex situ*, atenuação natural, bioestimulação, bioaumentação, fitorremediação com plantas, fitorremediação com fungos, landfarming, compostagem e biorreatores.

Após a busca, foram encontrados um total de 96 artigos, nas línguas portuguesa, inglesa e espanhola, os quais foram submetidos a um processo de verificação e análise, conforme disposto no protocolo PRISMA-Principais Itens para Relatar Revisões Sistemáticas e Meta-análises (Moher et al., 2009). Os artigos passaram por um processo inicial de verificação e triagem, primeiramente através da leitura e a análise dos títulos e resumos, excluindo-se artigos que não atenderam à proposta deste trabalho. Posteriormente, foi realizado o cruzamento entre as bases para retirar os duplicados, restando 56 artigos. Em seguida os artigos selecionados foram novamente confrontados com os critérios de inclusão e avaliados por todos os autores desta revisão, não havendo discordâncias quanto à sua inclusão.

## 3 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 A biorremediação

A atuação da biorremediação é extremamente importante para retirada de poluição no meio ambiente, que pode gerar danos à saúde de seres humanos e animais, como afetar o sistema nervoso, interferir no crescimento de plantas levando à diminuição da qualidade e da segurança alimentar (BALA *et al.*, 2022). O conceito de biorremediação abrange a utilização de plantas e microrganismos para a remediação, conhecida como fitorremediação e remediação microbiana, respectivamente. Esses métodos divergem significativamente nos processos e mecanismos pelos quais as plantas e microrganismos podem imobilizar, remover ou degradar poluentes (KHALID *et al.*, 2017). Esta tecnologia é dividida em dois tipos, dependendo das condições do meio e do tipo de poluente, sendo *in situ* e *ex situ* (BALA *et al.*, 2022).

A biorremediação *in situ* compreende a retirada do poluente no local onde surgiu, ou seja, não há remoção de solo nem perturbação ambiental, é uma maneira mais econômica quando comparada com a *ex situ*, exemplos de técnicas *in situ* são: atenuação natural, bioestimulação, landfarming, fitorremediação e bioaumentação (BALA *et al.*, 2022).

A *ex situ* compreende a retirada do poluente através da locomoção do contaminado, como por exemplo o solo, para remoção e restauração deste contaminante em outro local de tratamento, as técnicas utilizadas são: compostagem e biorreatores (LIAO *et al.*, 2022).

### 3.2 Técnicas de biorremediação

A biorremediação promove ao meio ambiente contaminado diversos processos para que ocorra a descontaminação de forma ecológica, econômica e benéfica, desta forma, é uma técnica com algumas vertentes, como atenuação natural, bioestimulação, bioaumentação,

fitorremediação, landfarming, compostagem e biorreatores (Quadro 1) (ZENELI *et al.*, 2019; VARJANI; UPASANI, 2019; KAFLE *et al.*, 2022).

Quadro 1 – Diferentes técnicas de biorremediação.

<b>Técnicas:</b>	<b>Atuações:</b>
Atenuação natural	É um processo natural lento e exige monitoramento, mais eficiente quando em combinação com outras técnicas;
Bioestimulação e <u>bioaumentação</u>	Atuam através da ação microbiana (normalmente, específicas para cada localidade – solo, água, etc.) para degradar contaminantes;
<u>Fitorremediação</u>	Utiliza-se plantas e fungos para realizar a descontaminação de solo e água;
<u>Landfarming</u>	Aplica-se periodicamente resíduos oleosos com presença de carbono orgânico no solo na zona arável, podendo ser incorporado à fertilizantes para ativar a atividade microbiana;
Compostagem	É um processo aeróbico, que necessita de oxigênio e umidade, onde o material orgânico é transformado em adubo natural;
Biorreatores	Em tanques, o solo contaminado é misturado com água e os resíduos sólidos ficam suspensos para coleta através de sistema de rotação.

Fonte: Elaborado pelos autores.

### 3.2.1 Atenuação natural

Na atenuação natural, o processo de redução da contaminação é decorrente da combinação de fatores naturais como volatilização, diluição, escoamento, adsorção e degradação microbiana, necessitando do auxílio de outros métodos de remediação, como bioestimulação e bioaumentação (ABENA *et al.*, 2019; LOPES *et al.*, 2022).

Em razão disso, foi observado que a utilização deste tipo de biorremediação não apresenta eficiência total, como observado em solos contaminados por hidrocarbonetos totais de petróleo (TPH), onde constataram a diminuição na concentração de TPH com o aumento no tempo de incubação utilizando a bioaumentação, o que não foi observado utilizando o processo de atenuação natural (ATENA *et al.*, 2019). Os mesmos resultados foram observados por Truskewycz *et al.* (2019), que afirmou que a atenuação natural é um processo que não tem a capacidade de remediar as contaminações com alto teor petroquímico.

Alguns microrganismos podem degradar hidrocarbonetos de petróleo do solo e das águas subterrâneas. ULLAH, S. *et al* (2022) descreve que o derramamento de óleo nos oceanos altera as características físico-químicas, assim as bactérias desempenham um papel importante no processo de desintoxicação do óleo, a degradação final e completa é realizada principalmente pela microflora marinha, particularmente bactérias.

### 3.2.2 Bioestimulação e Bioaumentação

A degradação de determinados poluentes pode ser limitada por características físicas e químicas do meio, como temperatura, pH e umidade, a bioestimulação utiliza a incorporação de nutrientes como nitrogênio (N) e fósforo (P) e o oxigênio no solo, estimulando as condições de crescimento e atividade microbiana necessárias, uma das dificuldades neste procedimento é compreender qual a profundidade correta para que os nutrientes possam ser adicionados no solo para que estejam disponíveis aos microrganismos (BENTO *et al.*, 2005; ABDULSALAM; OMALE, 2009; ZENELI *et al.*, 2019; BOSCO *et al.*, 2020).

Diferentemente, a bioaumentação, é realizada através da inoculação em alta concentração de microrganismos específicos para cada tipo de meio, como solo e água (BENTO *et al.*, 2005; ABDULSALAM; OMALE, 2009). Normalmente é um tipo de biorremediador utilizado quando os poluentes são resistentes à determinados microrganismos biodegradantes (PHILP *et*

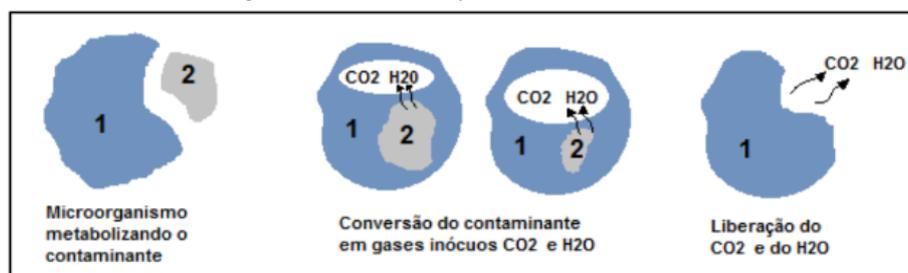
*al.*, 2005). No entanto, apesar das pequenas diversidades, ambas as técnicas compreendem o aumento microbiano para gerar a degradação dos poluentes presentes no meio (ZENELI *et al.*, 2019).

Alguns dos poluentes retirados de solos com auxílio destes processos é o óleo diesel (BENTO *et al.*, 2005), que é formado de n-alcenos e componentes poliaromáticos (CUNNINGHAM; PHILP, 2000). São componentes extremamente tóxicos, que quando vazados no solo pode gerar danos aos organismos presentes, ou ainda atingir lençóis freáticos (CUNNINGHAM; PHILP, 2000).

Também da base de óleo poluentes e como citado no tópico acima, tem se os TPH e os PAHs (hidrocarbonos aromáticos) são extremamente danosos ao meio ambiente e aos seres no geral, e após comparação dos métodos: atenuação natural, bioestimulação e bioaumento, o processo de biorremediação utilizando as técnicas de bioestimulação e bioaugmentação são mais eficientes na retirada de poluentes sólidos, comprovando serem simples, econômicas e ecológicas (ZENELI *et al.*, 2019).

Um dos processos de retirada desses hidrocarbonos e hidrocarbonetos do meio é através da quebra do contaminante em partículas menores com a ação de microrganismos, liberando compostos como CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O para o meio ambiente, demonstrado na Figura 1 (SOUZA, 2016).

Figura 1 – Processo de quebra do contaminante



Fonte: Souza, 2016

Outro exemplo de poluente é o 1,4-dioxano, um produto químico utilizado em indústrias, a biorremediação deste poluente ocorre assim que os microrganismos o alcançam e o utiliza como fonte de carbono e energia, ou ainda, quando os microrganismos degradam este químico por meio do metabolismo (RAMOS-GARCÍA; WALECKA-HUTCHISON; FREEDMAN, 2022). Este é um método biológico que remove os poluentes do meio contaminado através da atividade de enzimas que são sintetizadas pelo metabolismo de microrganismos de outro composto químico (ARP; YEAGER; HYMAN, 2001; HAZEN, 2010).

### 3.2.3 Fitorremediação

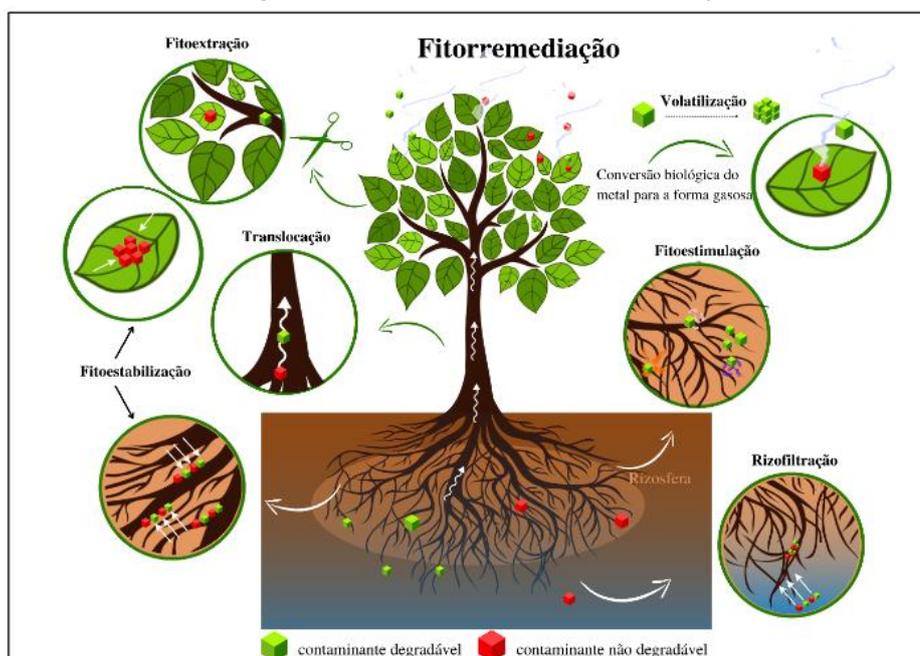
Diante alto custo das técnicas de remediação comumente utilizados, a fitorremediação demonstra ser uma alternativa viável e eficiente, na qual diferentes espécies de plantas são usadas para remediar áreas contaminadas, ou seja, degradar, extrair, conter ou imobilizar contaminantes dos solos e das águas e assim, diminuir sua biodisponibilidade (MORITA; MORENO, 2022). A fitorremediação caracteriza cinco tipos de processos, sendo eles: rizofiltração, fitoestabilização, fitoextração, fitovolatilização e fitoestimulação (NAZ *et al.* 2024).

Estas técnicas atuam diferentemente para cada situação, na rizofiltração o

contaminante é filtrado, absorvido e adsorvido pelas raízes das plantas. Na fitoestabilização as plantas vão estabilizar o contaminante nas partes aéreas e raízes, e não há necessidade da retirada da planta do local contaminado (PEREIRA, 2022).

No processo de fitoextração as plantas absorvem e transportam o contaminante até as folhas, e é mais utilizada para remoção de metais, as plantas neste caso deve ser retirada do local. Na fitovolatilização as plantas vão absorver o contaminante e o liberar em forma gasosa, normalmente contaminante metálicos. E por último, a fitoestimulação ocorre quando a planta utiliza a ação de microrganismos que degradam os contaminantes, através de exsudatos radiculares ou na presença de tecidos vegetais (Figura 2) (PEREIRA, 2022).

Figura 2 – Resumo das técnicas de fitorremediação



Fonte: Pereira,2022.

Shaari *et al.* (2021) revisa a fitorremediação do cádmio (Cd) e sua forma de atuação no metabolismo das plantas. As plantas absorvem os íons de Cd, em oposição que são distribuídos e absorvidos pelas folhas, frutos e sementes comestíveis através das raízes das plantas. O estresse abiótico iniciado pelo Cd em níveis de fitotoxicidade pode introduzir distúrbios bioquímicos e moleculares, causando subsequentemente estresse oxidativo, resultando em danos ao DNA, membrana celular e proteínas, mutação genética, peroxidação lipídica, redução do crescimento e desenvolvimento (SHAARI *et al.*, 2021).

Esta área da biotecnológica é definida a partir da aplicação de processos biológicos para o tratamento da poluição ou como um processo que emprega uso de plantas verdes e vivas, além do uso de microrganismos e seus compostos para desintoxicar contaminantes no solo ou outros ambientes (FARIA *et al.*, 2017). Sendo assim, explora a diversidade dos agentes biológicos para a degradação e transformação dos poluentes orgânicos favorecidos pelo menor custo e maior eficiência na remoção dos contaminantes, mas esses processos dependem das condições do ambiente, como pH, umidade, quantidade de nutrientes e minerais do solo, temperatura e as próprias características químicas e físicas do poluente (KUINCHNER *et al.*, 2023).

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMA), são pertencentes ao subfilo Glomeromycotina (filo Mucoromycota), pertencentes ao grupo das endomicorrizas, (SPATAFORA

et al, 2016). São biotróficos obrigatórios, caracterizados por estabelecerem uma relação simbiótica e mutualística às raízes das plantas, promovendo ganho de nutrientes como fósforo (P) e nitrogênio (N), zinco (Zn), cobre (Cu) e ferro (Fe). Aumentam a capacidade de absorção de água, de fitoestabilização e da tolerância das plantas à estresses ambientais de modo geral (NUNES *et al.*, 2019; FONSECA *et al.*, 2020).

Assim que a simbiose é estabelecida, o processo de biorremediação poderá ser possível se o organismo for tolerante ao poluente e se estes organismos possuírem a capacidade enzimática para degradar o contaminante (MEHARG; CAIRNEY, 2000).

Precisa-se entender os mecanismos de imobilização dos metais na biomassa fúngica, nos componentes da parede das hifas intra ou extra-radical, no interior de células e na quelatação do metal por compostos secretados. Além disso entender se a mitigação da toxicidade pelo metal é consequência nutricional da associação ou uma influência do FMA na resposta fisiológica da planta ao estresse (ANDRADE *et al.*, 2009).

Grande parte da atividade biológica do solo é estruturada através da ação dos FMAs que atuam na formação do solo e na sua estabilização, nutrição, suporte a diversos estresses e equilíbrio ambiental em terras nativas ou cultivadas (BARBOSA *et al.*, 2019). A simbiose micorrízica garante às espécies hospedeiras sucesso adaptativo em solos com baixa fertilidade, pois o fungo melhora a tolerância à acidez, à toxidez por metais pesados e contribui para a resistência às doenças presentes no ambiente (FARIA *et al.*, 2017).

A compatibilidade e especificidade entre FMAs e as plantas hospedeiras, promovem uma maior multiplicação de esporos, colonização micorrízica, crescimento de hifas extra-radulares e produção de proteína do solo. Os FMAs também se beneficiam ao receber energia e carbono através do metabolismo fotossintético das plantas (BARBOSA *et al.*, 2019).

#### 3.2.4 Landfarming

O landfarming é uma tecnologia de biorremediação que consiste na aplicação do resíduo na superfície do solo para sua degradação biológica entre 15 à 20 centímetros, denominado como zona arável, este tipo de sistema é mais aplicado para tratar lodo ou borra oleosa. No entanto, essa tecnologia necessita de um longo período para concretização do processo, principalmente por se tratar de grandes áreas, com riscos de contaminação das águas subterrâneas se o tratamento não for devidamente aplicado (CRIVELARO et al., 2010).

Coutinho e Felix da Silva (2022), apresentam o landfarming como uma tecnologia de grande custo-benefício, principalmente no tratamento dos resíduos sólidos oriundos da indústria do petróleo. Por conta disso existem requisitos operacionais que fixam as condições exigíveis para este tratamento de solo, a ABNT NBR ISO 13.894, 1997, que prevê a regularização da área, da solução, da instalação e cita inclusive um monitoramento climático para que não haja interferências inibitórias do sistema (COUTINHO; FELIX DA SILVA, 2022).

Guarino, Spada e Sciarillo (2017) avaliaram três sistemas de biorremediação em um solo contaminado por hidrocarbonetos de petróleo, foi relatado a remoção do resíduo utilizando a técnica de landfarming, com uma redução de em média de 70% do total de hidrocarbonetos. Neste estudo foram aplicadas outras estratégias de tratamento, mas o melhor resultado foi observado na combinação de landfarming assistido por bioaumento, com em média 86% de remoção do contaminante (GUARINO; SPADA; SCIARRILLO, 2017).

Sabendo que esta tecnologia de biorremediação depende fortemente da capacidade

dos microrganismos em tratar esses contaminantes e ainda das condições físicas e químicas do solo, Effendi, Ramadan e Helmy (2022), estudaram a aplicação de descargas eletrocinéticas em solo franco-argiloso contaminado com hidrocarbonetos. Assim constataram que o processo sequencial de lavagem eletrocinética do solo como uma aprimoração no tratamento landfarming, produz maior eficiência de remoção de hidrocarbonetos do que a atenuação natural, visto que pode haver aumento de microrganismos em nos tratamentos (EFFENDI; RAMADAN; HELMY, 2022).

### 3.2.5 Compostagem

A biorremediação de compostagem é a adaptação e aplicação da tecnologia de compostagem para resíduos e tratamentos contaminantes em solos. Classificada como *ex situ*, a compostagem um processo aeróbico que depende principalmente da presença de oxigênio, níveis de umidade ideais e porosidade para estabilizar resíduos orgânicos. Suas variáveis de controle típicas incluem temperatura, oxigênio e umidade (HAUG et al., 2018; SAYARA et al., 2020). É um processo biológico que envolve o aquecimento autossustentável e tem sido empregado por séculos como uma solução para o tratamento de resíduos orgânicos. Além de lidar com esses resíduos, o composto resultante pode ser empregado como um melhorador de solo e fertilizante orgânico (LIN et al., 2022)

Fundamentalmente, o processo implica na introdução de co-substratos ou emendas orgânicas no solo contaminado. À medida que esses co-substratos amadurecem, graças à ação de diversas comunidades microbianas presentes na mistura, ocorre a degradação dos poluentes alvo (SEMPLE et al., 2001; SAYARA et al., 2020). É comum a inclusão de materiais orgânicos como esterco, resíduos de jardim e subprodutos do processamento de alimentos. Esses componentes são adicionados para enriquecer o solo com nutrientes e matéria orgânica de fácil decomposição, (NAMKOONG et al., 2002). Esta técnica tem alta eficácia da biorremediação de diferentes componentes contaminantes orgânicos, como pesticidas, explosivos, clorofenóis e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (LEMMON et al.,1992; SEMPLE et al.,2001; LOICK et al.,2009; GANDOLFI et al.,2010; SAYARA et al., 2011).

Para alcançar eficácia em um processo de compostagem em um tempo adequado, é essencial otimizar os parâmetros de controle conforme os valores ideais. O processo de compostagem é dividido em quatro fases distintas: mesofílica, termofílica, de resfriamento e maturação. Cada uma dessas fases apresenta características específicas, como variação de temperatura, requisitos de oxigênio, composição da comunidade microbiana, estabilidade, teor de carbono, teor de nitrogênio e perfil de pH (LIN et al., 2022).

Definido pela alta atividade microbiana e necessitando de uma alta taxa de aeração para manter uma condição aeróbica, o estágio de decomposição é caracterizado pela elevação da temperatura, saindo de 25-45° C (faixas mesófilas) para mais de 45° C (faixa termofílicas), necessitando de uma alta taxa (SAYARA et al., 2020). Nesta última fase, também ocorre a modificação do composto, tornando os contaminantes menos viscosos e mais biodisponíveis (LIN et al., 2022). Após a decomposição, ocorre o processo de cura, ao qual devido o esgotamento de nutrientes no meio, há diminuição da atividade microbiana decorrendo também em queda de temperatura. Nesta fase também ocorre o processo de umificação, aumentando o valor ao composto (HSU et al., 1999).

A compostagem de resíduos orgânicos representa uma opção altamente relevante e sustentável, que possibilita o descarte ecológico de resíduos, além de acelerar a taxa de

biodegradação dos poluentes (CHEN et al., 2015). Todavia, como o processo envolve a mistura de solo contaminado com co-substratos orgânicos, quaisquer falhas podem resultar na produção de uma quantidade significativamente maior de material contaminado, o que é reconhecido como a principal preocupação associada a essa abordagem (LATAWIEC et al., 2010).

Esta vulnerabilidade, juntamente com a falta geral de informações sobre a toxicidade, distribuição e biodisponibilidade de tais contaminantes em solos modificados por compostagem. Essa fragilidade, alinhada com falta de informações sobre a toxicidade, distribuição e biodisponibilidade dos componentes contaminantes em solos modificados pelo composto, pode acarretar na implementação de medidas de avaliação do solo muito rigorosas, o que, por sua vez, impactaria nos custos de remediação (SAYARA et al., 2020).

### 3.2.6 Biorreatores

Os biorreatores são recipientes nos quais as matérias-primas passam por uma série de reações biológicas para se transformarem em produtos específicos, são classificados como biorremediação *ex situ*. O excelente controle dos parâmetros do bioprocessamento, como temperatura, pH, agitação, taxas de aeração, concentrações de substrato e inóculo, é uma das principais vantagens da biorremediação com o uso de biorreatores (AZUBUIKE et al., 2016).

É fundamental destacar que, ao serem implementados em biorreatores, a bioaugmentação controlada e a melhoria da biodisponibilidade de poluentes, juntamente com a transferência eficiente de massa entre poluentes e microrganismos, superam as limitações tradicionais da biorremediação, resultando em um processo mais eficiente. Desta forma, biorreatores podem ser especialmente projetados em diversas configurações com o objetivo de otimizar a degradação biológica e minimizar as perdas abióticas (MOHAN et al. 2004; GRADY et al., 2011).

Adicionalmente, ele pode ser empregado no tratamento de solo ou água contaminados com compostos orgânicos voláteis, como benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos. A utilização de diversos tipos de biorreatores em aplicações de biorremediação tem demonstrado eficácia na remoção de uma vasta variedade de poluentes. Em estudo, Chikere et al (2016) relata o uso de biorreator de tanque de agitação para biorremediação de sedimento poluído por óleo bruto, composto por petróleo e hidrocarbonetos poliaromáticos, com remoção de 80 a 97%.

Biorreator de lodo granular expandido, foi utilizado para a biorremediação de águas residuais de lavanderia contendo alquilbenze sulfonato linear, com eficácia de aproximadamente 90% (DELFORNO et al., 2015). Bem como, o uso de biorreator de chorume de rolos, para remoção de 97 a 100% de ácido 2,4-diclorofenoxiacético em solos contaminados (MUSFATA et al., 2015). Como diversos outros exemplos de poluentes, como xileno em logo farmacêutico (SARAVANAN et al., 2015), naftaleno e nitrogênio em águas residuais de gaseificação de carvão (XU et al., 2015) e carbofurano em solos contaminados (PLANGKLANG e REUNGSANGET, 2010).

A capacidade de gerenciar e ajustar os parâmetros do processo em um biorreator implica que as reações biológicas internas podem ser otimizadas para efetivamente reduzir o tempo necessário para a biorremediação. Diversos modos de operação estão disponíveis para o biorreator, como lote, lote alimentado, lote sequencial, operação contínua e estágios múltiplos. A preferência do modo operacional é motivada principalmente pela economia de mercado e pelos custos gerados (AZUBUIKE et al., 2016). Amostras contaminadas podem ser inseridas em um biorreator na forma de matéria seca ou pasta. Em ambas as circunstâncias, a utilização de um biorreator no tratamento de solo contaminado proporciona inúmeras vantagens em relação

a outras técnicas de biorremediação *ex situ*.

Por fim, o biorreator atua como um sistema hermeticamente fechado, possibilitando a aplicação de microrganismos geneticamente modificados, para a otimização do processo. Após a conclusão do procedimento, os microrganismos podem ser devidamente desativados, garantindo que nenhum material genético externo seja liberado no ambiente quando o solo tratado for reintegrado ao campo ou descartado (AZUBUIKE *et al.*, 2016).

#### **4 DESAFIOS DA BIORREGULAÇÃO**

A biorremediação, apesar de suas vantagens, possui algumas limitações relacionadas à biodegradabilidade dos compostos. Nem todos os compostos são facilmente degradáveis, havendo preocupações sobre a persistência ou toxicidade dos produtos resultantes da biodegradação (SHARMA, 2012). Além disso, os processos biológicos são altamente específicos, exigindo condições ideais, como a presença de populações microbianas apropriadas, condições ambientais adequadas e níveis adequados de nutrientes e contaminantes (OSSAI, 2020). Desta forma, a aplicação da biorremediação em escala real enfrenta desafios. A pesquisa é essencial para desenvolver tecnologias de biorremediação adaptadas a locais com misturas complexas de contaminantes, presentes em diferentes estados físicos, tornando o seu desempenho desafiador.

#### **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A ação antrópica causa de inúmeras formas danos aos ecossistemas e intoxica solos e rios com seus resíduos altamente poluentes. Considerando que os meios de transformação e quebra desses compostos são cada vez mais requisitados e caros, a biorremediação apresenta uma solução prática e viável para a remoção ou atenuação desses efeitos no ambiente. A variação de técnicas se torna cada vez mais ampla e disponível para produtores e empresas, desde em pequena a larga escala.

É uma tecnologia limpa e promissora, acreditamos que existe maneiras infinitas de estudá-las, visto que mais espécies de plantas, microrganismos e outros compostos naturais ainda não foram pesquisados. Outra grande oportunidade dentro destes sistemas são suas combinações que podem potencializar sua ação e aumentar ainda mais a capacidade de remoção dos poluentes no meio.

Porém, mesmo sendo uma tecnologia de fácil manejo e implantação, vimos que elas dependem da área de implantação, do clima, dos organismos envolvidos, do tipo de poluente e acima de tudo do monitoramento do sistema, para assim garantir o sucesso da remediação e evitar contaminações de outros locais.

Por fim, entender que a sustentabilidade está presente nesses manejos, não anula a necessidade de elaborar novas estratégias diminuir o uso desses contaminantes, visto que pode haver a saturação dos ambientes e que mesmo transformados em outros compostos, os resíduos não deixarão de existir.

**REFERÊNCIAS**

- ABDUSALAM, S.; OMALE, A. B. **Comparison of biostimulation and bioaugmentation techniques for the remediation of used motor oil contaminated soil**. Brazilian Archives of biology and technology, v. 52, p. 747-754, 2009.
- ABENA, Marie Thérèse Bidja *et al.* **Biodegradation of total petroleum hydrocarbons (TPH) in highly contaminated soils by natural attenuation and bioaugmentation**. Chemosphere, v. 234, p. 864-874, 2019.
- ABNT – **Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR 13894: tratamento no tolo: landfarming**. Rio de Janeiro, 1997.
- AZUBUIKE, C. C.; CHIKERE, C. B.; OKPOKWASILI, G. C. **Bioremediation techniques—classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects**. World Journal of Microbiology and Biotechnology, v. 32, p. 1-18, 2016.
- BALA, S. *et al.* **Recent strategies for bioremediation of emerging pollutants: a review for a green and sustainable environment**. Toxics, v. 10, n. 8, p. 484, 2022.
- BARBOSA, M. V. *et al.* **Diferentes fungos micorrízicos arbusculares afetam a formação e estabilidade dos agregados do solo?** Ciência e Agrotecnologia [online], v. 43, e003519, 2019.
- BARBOSA, M. V. *et al.* **Fungos micorrízicos arbusculares e Urochloa brizantha: simbiose e multiplicação de esporos**. Pesquisa Agropecuária Tropical [online]. v. 49, e54530, 2019.
- BENTO, M. *et al.* **Comparative bioremediation of soils contaminated with diesel oil by natural attenuation, biostimulation and bioaugmentation**. Bioresource technology, v. 96, n. 9, p. 1049-1055, 2005.
- BOSCO, F. *et al.* **Microcosm evaluation of bioaugmentation and biostimulation efficacy on diesel-contaminated soil**. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, v. 95, n. 4, p. 904-912, 2020.
- BRUNETTO, G. *et al.* **Metais pesados em solos de vinhedos e pomar**. Revista Brasileira de Fruticultura [online]., v. 39, n. 2, e-263, 2017.
- CHEN, M. *et al.* **Bioremediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons, petroleum, pesticides, chlorophenols and heavy metals by composting: applications, microbes and future research needs**. Biotechnology advances, v. 33, n. 6, p. 745-755, 2015.
- CHIKERE, C. B. *et al.* **Microbial community profiling of active oleophilic bacteria involved in bioreactor-based crude-oil polluted sediment treatment**. Journal of Applied and Environmental Microbiology, v. 4, n. 1, p. 1-20, 2016.
- CRIVELARO, S. H. R. *et al.* **Evaluation of the use of vinasse as a biostimulation agent for the biodegradation of oily sludge in soil**. Brazilian Archives of Biology and Technology, v. 53, n. 5, p. 1217–1224, set. 2010.
- COUTINHO, J.; FELIX DA SILVA, D. Estudo de viabilidade do tratamento de borras de óleo com o uso da técnica de landfarming. **Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas - UNIT - ALAGOAS**, [S. l.], v. 7, n. 2, p. 55, 2022.
- CUNNINGHAM, C. J.; PHILP, J. C. **Comparison of bioaugmentation and biostimulation in ex situ treatment of diesel contaminated soil**. Land Contamination and Reclamation, v. 8, n. 4, p. 261-9, 2000.
- DELFORNO, T. P. *et al.* **Microbial diversity and the implications of sulfide levels in an anaerobic reactor used to remove an anionic surfactant from laundry wastewater**. Bioresource Technology, v. 192, p. 37-45, 2015.
- DIAS, G. *et al.* **Biorremediação de efluentes por meio da aplicação de microalgas - uma revisão**. Química Nova [online]. v. 42, n. 8, p. 891-899, 2019.
- EFFENDI, A. J.; RAMADAN, B.S.; HELMY, Q. **Enhanced remediation of hydrocarbons contaminated soil using electrokinetic soil flushing – Landfarming processes**, Bioresource Technology Reports, v. 17, e100959, 2022.
- FARIA, A. B. de C. *et al.* **Uso de ectomicorizas na biorremediação florestal**. Ciência Florestal [online]. 2017, v. 27, n. 1, p. 21-29, 2017.
- FONSECA, A. J. *et al.* **Papel dos fungos micorrízicos arbusculares na aclimação de clones de Coffea arabica L.**

**produzidos por embriogênese somática.** Ciência e Agrotecnologia [online]. v. 44, 2020

GANDOLFI, I. et al. **Influence of compost amendment on microbial community and ecotoxicity of hydrocarbon-contaminated soils.** Bioresource technology, v. 101, n. 2, p. 568-575, 2010.

GIOVANELLA, P. et al. **Metal resistance mechanisms in Gram-negative bacteria and their potential to remove Hg in the presence of other metals.** Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 140, p. 162-169, 2017.

GRADY JR, CP Leslie et al. **Biological wastewater treatment.** CRC press, 2011.

GUARINO, C.; SPADA, V.; SCIARRILLO, R. **Assessment of three approaches of bioremediation (Natural Attenuation, Landfarming and Bioaugmentation – Assisted Landfarming) for a petroleum hydrocarbons contaminated soil,** Chemosphere, v. 170, p. 10-16, 2017.

HAZEN, T. C. **Cometabolic bioremediation.** 2010.

HAUG, R. **The practical handbook of compost engineering.** Routledge, 2018.

HSU, J.; LO, S. **Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformations during composting of pig manure.** Environmental pollution, v. 104, n. 2, p. 189-196, 1999.

KAFLE, A. et al. **Phytoremediation: Mechanisms, plant selection and enhancement by natural and synthetic agents.** Environmental Advances, v. 8, p. 100203, 2022.

KHALID, Sana et al. **A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils.** Journal of geochemical exploration, v. 182, p. 247-268, 2017.

KUINCHTNER, C. C. et al. **Morpho-physiological and biochemical mechanisms of copper tolerance in *Handroanthus heptaphyllus*.** Ciência e Agrotecnologia, v. 47, p. e011322, 2023.

LATAWIEC, A. E. et al. **Bringing bioavailability into contaminated land decision making: the way forward?.** Critical Reviews in Environmental Science and Technology, v. 41, n. 1, p. 52-77, 2010.

LEMMON, Carol R.; PYLYPIW, Harry M. **Degradation of diazinon, chlorpyrifos, isofenphos, and pendimethalin in grass and compost.** Bulletin of environmental contamination and toxicology, v. 48, p. 409-415, 1992.

LIAO, X. et al. **In situ remediation and ex situ treatment practices of arsenic-contaminated soil: An overview on recent advances.** Journal of Hazardous Materials Advances, v. 8, p. 100157, 2022.

LIN, C. et al. **Composting and its application in bioremediation of organic contaminants.** Bioengineered, v. 13, n. 1, p. 1073-1089, 2022.

LOICK, N. et al. **Bioremediation of poly-aromatic hydrocarbon (PAH)-contaminated soil by composting.** Critical Reviews in Environmental Science and Technology, v. 39, n. 4, p. 271-332, 2009.

LOPES, P. R. M. et al. **Microbial bioremediation of pesticides in agricultural soils: an integrative review on natural attenuation, bioaugmentation and biostimulation.** Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, v. 21, n. 4, p. 851-876, 2022.

MISHRA, J., SINGH, R., ARORA, N.K. **Alleviation of heavy metal stress in plants and remediation of soil by rhizosphere microorganisms.** Frontiers Microbiology, 2017.

MOHAN, S. Venkata et al. **Degradation of chlorpyrifos contaminated soil by bioslurry reactor operated in sequencing batch mode: bioprocess monitoring.** Journal of Hazardous Materials, v. 116, n. 1-2, p. 39-48, 2004.

MORITA, A. K. M.; MORENO, F. N. **Fitorremediação aplicada a áreas de disposição final de resíduos sólidos urbanos.** Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 27, n. 2, p. 377-384, mar. 2022.

MUSTAFA, Y. A.; ABDUL-HAMEED, H. M.; RAZAK, Z. A. **Biodegradation of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid contaminated soil in a roller slurry bioreactor.** CLEAN–Soil, Air, Water, v. 43, n. 8, p. 1241-1247, 2015.

NAZ, R. et al. **Assessment of phytoremediation potential of native plant species naturally growing in a heavy metal-polluted industrial soils.** Brazilian Journal of Biology, v. 84, p. e264473, 2024.

NIVETHA, N. *et al.* **A comprehensive review on bio-stimulation and bio-enhancement towards remediation of heavy metals degeneration.** Chemosphere, p. 137099, 2022.

NUNES, A. B. C. *et al.* **Nutrição de escória de aço e fosfato de milho inoculado com fungos micorrízicos arbusculares.** Pesquisa Agropecuária Brasileira [online]. v. 54, e00096, 2019.

OSSAI, Innocent Chukwunonso et al. **Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: A review.** Environmental Technology & Innovation, v. 17, p. 100526, 2020.

PEREIRA, A. R. **Espécies de plantas nativas brasileiras com potencial de fitorremediação de metais: uma revisão de literatura.** Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Uberlândia, 2022.

PHILP, J. C. *et al.* **Environmental pollution and restoration: a role for bioremediation.** Bioremediation: Applied Microbial Solutions for Real-World Environmental Cleanup, p. 1-48, 2005.

PLANGKLANG, P.; REUNGSANG, A. **Bioaugmentation of carbofuran by Burkholderia cepacia PCL3 in a bioslurry phase sequencing batch reactor.** Process Biochemistry, v. 45, n. 2, p. 230-238, 2010.

RAMALHO, J.F.G.P.; AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; VELLOSO, A.C.X. **Acúmulo de metais pesados em solos cultivados com cana de açúcar pelo uso contínuo de adubação fosfatada e água de irrigação.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG, v.2, p.971-9, 1999.

RAMOS-GARCÍA, Á. A.; WALECKA-HUTCHISON, C.; FREEDMAN, D. L. **Effect of biostimulation and bioaugmentation on biodegradation of high concentrations of 1, 4-dioxane.** Biodegradation, v. 33, n. 2, p. 157-168, 2022.

SARAVANAN, V.; RAJASIMMAN, M.; RAJAMOCHAN, N. **Performance of packed bed biofilter during transient operating conditions on removal of xylene vapour.** International Journal of Environmental Science and Technology, v. 12, p. 1625-1634, 2015.

SAYARA, Tahseen et al. **Bioremediation of PAHs-contaminated soil through composting: Influence of bioaugmentation and biostimulation on contaminant biodegradation.** International Biodeterioration & Biodegradation, v. 65, n. 6, p. 859-865, 2011.

SEMPLE, Kirk T.; REID, Brian J.; FERMOR, T. R. **Impact of composting strategies on the treatment of soils contaminated with organic pollutants.** Environmental pollution, v. 112, n. 2, p. 269-283, 2001.

SHAARI, N. E. M., *et al.* **Cadmium toxicity symptoms and uptake mechanism in plants: a review.** Brazilian Journal of Biology, vol. 84, e252143, 2021.

SHARMA, Shilpi. **Bioremediation: features, strategies and applications.** Asian Journal of Pharmacy and Life Science, v. 2231, p. 4423, 2012.

SILVA, L. N. A.; FERNANDES, J. A. F. Técnicas de biorremediação microbiana de solos contaminados com metais pesados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 12., 2021, Salvador. **Anais.** Salvador: Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais (IBEAS), 2021. V.10

SOUZA, R. B. G. **Avaliação da contaminação por hidrocarbonetos do solo e da água da região de avaré.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual Paulista "Julio Mesquita Filho", Bauru, 2016.

SREEKUMAR, N., UDAYAN, A., SRINIVASAN, S. **Removal of Toxic Pollutants Through Microbiological and Tertiary Treatment: Algal bioremediation of heavy metals,** Amsterdam: Elsevier 2020.

TRUSKEWYCZ, Adam *et al.* **Petroleum hydrocarbon contamination in terrestrial ecosystems—fate and microbial responses.** Molecules, v. 24, n. 18, p. 3400, 2019.

ULLAH, S. *et al.* **Biodegradation of petroleum by bacteria isolated from fishes of Indian Ocean.** Brazilian Journal of Biology, v. 82, p. e244703, 2022.

VARJANI, S.; UPASANI, V. N. **Influence of abiotic factors, natural attenuation, bioaugmentation and nutrient**

**supplementation on bioremediation of petroleum crude contaminated agricultural soil.** Journal of environmental management, v. 245, p. 358-366, 2019.

ZENELI, A. *et al.* **Monitoring the biodegradation of TPH and PAHs in refinery solid waste by biostimulation and bioaugmentation.** Journal of environmental chemical engineering, v. 7, n. 3, p. 103054, 2019.

ZHANG, C., *et al.*, **Simultaneous degradation of trichlorfon and removal of Cd(II) by *Aspergillus sydowii* strain PA F-2.** Environ. Sci. Pollut. Res., v.26, p.26844–26854, 2019.