



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS I – CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM BACHARELADO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL**

LÍVIA CHAGAS DE ANDRADE SANTOS

**CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA DAS TÉCNICAS DE BIORREMEDIAÇÃO PARA
DESCONTAMINAÇÃO E RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS**

**CAMPINA GRANDE - PB
2024**

LÍVIA CHAGAS DE ANDRADE SANTOS

**CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA DAS TÉCNICAS DE BIORREMEDIAÇÃO PARA
DESCONTAMINAÇÃO E RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso (Artigo) apresentado a Coordenação do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira Sanitarista e Ambiental.

Área de concentração: Meio Ambiente.

Orientadora: Profa. Dra. Lígia Maria Ribeiro Lima

**CAMPINA GRANDE - PB
2024**

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto em versão impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que, na reprodução, figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

S237c Santos, Livia Chagas de Andrade.

Contribuição científica das técnicas de biorremediação para descontaminação e recuperação de áreas degradadas [manuscrito] / Livia Chagas de Andrade Santos. - 2024.
19 f.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia sanitária e ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2024.

"Orientação : Prof. Dra. Lígia Maria Ribeiro Lima, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT".

1. Áreas degradadas - resíduos industriais. 2. Áreas degradadas - descontaminação. 3. Biorremediação. I. Título

21. ed. CDD 363.73

LÍVIA CHAGAS DE ANDRADE SANTOS

CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA DAS TÉCNICAS DE BIORREMEDIAÇÃO PARA
DESCONTAMINAÇÃO E RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS

Trabalho de Conclusão de Curso (Artigo) apresentado a Coordenação do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira Sanitarista e Ambiental.

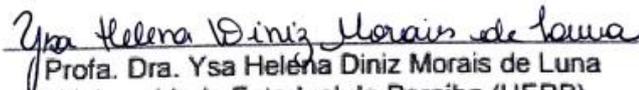
Área de concentração: Meio Ambiente.

Aprovada em: 22/11/2024.

BANCA EXAMINADORA



Profa. Dra. Lígia Maria Ribeiro Lima (Orientadora)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Profa. Dra. Ysa Helena Diniz Morais de Luna
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Profa. Dra. Vera Lúcia Meira de Morais Silva
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	05
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	06
2.1	Contaminação ambiental.....	06
2.1.1	<i>Contaminação da água</i>	07
2.1.2	<i>Contaminação do solo</i>	09
2.1.3	<i>Contaminação do ar</i>	10
2.3	Biorremediação.....	10
2.3.1	<i>Principais agentes da biorremediação</i>	11
2.3.2	<i>Técnicas de biorremediação</i>	12
2.4	Biorremediação e nanotecnologia.....	13
3	METODOLOGIA	14
4	CONCLUSÃO.....	15
	REFERÊNCIAS.....	15
	AGRADECIMENTOS.....	19

CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA DAS TÉCNICAS DE BIORREMEDIAÇÃO PARA DESCONTAMINAÇÃO E RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS

SCIENTIFIC CONTRIBUTION OF BIOREMEDIATION TECHNIQUES FOR DECONTAMINATION AND RECOVERY OF DEGRADED AREAS

Lívia Chagas de Andrade Santos*
Lígia Maria Ribeiro Lima**

RESUMO

A biorremediação é um processo que utiliza organismos vivos, como bactérias, fungos e plantas, para degradar ou remover poluentes de ambientes contaminados, possuindo a capacidade de transformar substâncias tóxicas em compostos menos prejudiciais ou em substâncias que podem ser incorporadas ao ciclo natural. Seu principal objetivo é promover a descontaminação e recuperação de áreas degradadas, especialmente aquelas afetadas por resíduos industriais, petróleo, produtos químicos e metais pesados. A relevância científica dessa abordagem tem crescido devido à sua sustentabilidade, baixo custo e eficácia em comparação com métodos tradicionais de remediação. Esse trabalho é uma revisão integrativa, que tem por finalidade sintetizar resultados obtidos em pesquisas sobre o tema biorremediação de áreas degradadas. Além de destacar estudos utilizando a nanotecnologia, que indicou por meio de resultados obtidos que há viabilidade para que as pesquisas se intensifiquem ainda mais, devido à eficiência do uso de nanomaterial sobre poluentes presentes em solos e águas, sendo importante ampliar os estudos em solos brasileiros, já que a maioria das pesquisas é internacional e não é possível transferir diretamente o conhecimento adquirido de solos temperados para solos residuais de clima tropical e subtropical. Diversos estudos científicos demonstraram que a biorremediação pode ser eficaz na recuperação de solos, águas e sedimentos contaminados por hidrocarbonetos, solventes, pesticidas e metais pesados. A eficácia dos processos depende de fatores como as características do poluente, as condições ambientais, como temperatura e pH, e a diversidade biológica do local. A área da biorremediação traz consigo um amplo espaço para a pesquisa científica em termos físicos, químicos e biológicos, possibilitando, ainda, um avanço significativo no seu uso para melhorar a qualidade das águas do país, nutrir a consciência ambiental e favorecer a humanização da sociedade.

Palavras-Chave: Estudo bibliográfico; áreas degradadas; biorremediação.

ABSTRACT

Bioremediation is a process that uses living organisms, such as bacteria, fungi and plants, to degrade or remove pollutants from contaminated environments, with the ability to transform toxic substances into less harmful compounds or substances that

*Graduanda de Engenharia Sanitária e Ambiental - UEPB. livia.chagas@aluno.uepb.edu.br

**Orientadora professora do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UEPB

can be incorporated into the natural cycle. Its main objective is to promote the decontamination and recovery of degraded areas, especially those affected by industrial waste, oil, chemicals and heavy metals. The scientific relevance of this approach has grown due to its sustainability, low cost and effectiveness compared to traditional remediation methods. This work is an integrative review, which aims to summarize results obtained in research on the subject of bioremediation of degraded areas. In addition to highlighting studies using nanotechnology, which indicated through the results obtained that there is feasibility for further intensifying research, due to the efficiency of the use of nanomaterials on pollutants present in soils and water, it is important to expand studies in Brazilian soils, since most of the research is international and it is not possible to directly transfer the knowledge acquired from temperate soils to residual soils in tropical and subtropical climates. Several scientific studies have shown that bioremediation can be effective in recovering soils, waters and sediments contaminated by hydrocarbons, solvents, pesticides and heavy metals. The effectiveness of the processes depends on factors such as the characteristics of the pollutant, environmental conditions, such as temperature and pH, and the biological diversity of the location. The area of bioremediation brings with it ample space for scientific research in physical, chemical and biological terms, also enabling significant advances in its use to improve the quality of the country's water, nurture environmental awareness and promote the humanization of society.

Keywords: Bibliographic study; degraded areas; bioremediation.

1 INTRODUÇÃO

Dentre os graves problemas ambientais da atualidade encontram-se a contaminação dos solos, das águas e do ar, que decorrem do descarte inadequado de resíduos orgânicos e inorgânicos, tanto de forma proposital quanto acidental. O acúmulo de substâncias em concentrações indesejáveis é responsável por sérios problemas ambientais, prejudica a capacidade do solo, água e ar, de desenvolver as suas várias funções, culmina em diversos problemas de saúde para o ser humano e afeta diversas formas de vida (MARQUES *et al.*, 2011).

A humanidade é geradora de uma imensa quantidade de resíduos que podem ser originários, por exemplo, das atividades industriais, agrícolas e do lixo domiciliar. O descarte desses resíduos no solo é consequência da concepção de que o solo possui capacidade de assimilação infinita. Metais tóxicos, agrotóxicos e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos são considerados alguns dos principais contaminantes do solo (JACQUES *et al.*, 2007; COSTA *et al.*, 2008).

O processo de contaminação do solo e do subsolo ocorre na deposição, disposição, descarga, infiltração, acumulação, injeção ou aterramento de produtos poluentes que se encontram em estado sólido, líquido ou gasoso. Assim, essa contaminação acontecerá sempre que ocorrer adição de compostos que alteram as características naturais do solo e as suas funcionalidades, produzindo assim impactos negativos ao mesmo (RIZZO *et al.*, 2007).

Apesar da preocupação com a contaminação dos solos ser recente, existem várias técnicas de remediação com possibilidade de aplicação, que tem por finalidade reduzir as concentrações de contaminantes a níveis seguros para a saúde humana, além de impedir a dispersão deles no ambiente (HUANG *et al.*, 2005).

A descontaminação pode ocorrer tanto *in situ* (ou *on-site*), tratamento feito no próprio local da contaminação, quanto *ex situ* (ou *off-site*), realizado fora do local onde ocorreu a contaminação, sendo que cada vez mais se tem dado preferência para a primeira, por apresentar menores custos, ser mais bem aceita por parte da população e não provocar contaminações secundárias (TAVARES, 2009).

Algumas técnicas de descontaminação são classificadas como biológicas, dentre elas a biorremediação e a fitorremediação (COLLA *et al.*, 2008).

As técnicas de biorremediação tem sido uma contribuição significativa para a ciência ambiental, oferecendo métodos eficazes para descontaminar e recuperar áreas degradadas. Essas técnicas utilizam microrganismos, como bactérias e fungos, para degradar ou transformar contaminantes químicos em produtos menos tóxicos ou inofensivos. Isso não só ajuda na remediação de solos e águas subterrâneas contaminadas, mas também é uma abordagem mais sustentável e econômica em comparação com métodos tradicionais. Além disso, as técnicas de biorremediação podem ser adaptadas para tratar uma ampla gama de contaminantes, desde hidrocarbonetos a metais pesados, promovendo assim a recuperação de ecossistemas degradados (ANDRADE *et al.*, 2010).

A fitorremediação faz uso de plantas para descontaminação de solos poluídos. Essa técnica se apresenta muito promissora nas condições brasileiras, visto a enorme biodiversidade e o clima tropical do país (MARQUES *et al.*, 2011).

Esse trabalho é uma revisão bibliográfica de caráter exploratório, que tem por finalidade explorar e compreender as contribuições científicas das técnicas de biorremediação e recuperação de áreas degradadas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Contaminação ambiental

A contaminação ambiental é definida como poluição quando atinge níveis que causam efeitos deletérios na saúde humana, ou efeitos prejudiciais nos organismos vivos (CETESB, 2021).

Benevides e Marinho (2015) destacaram que a busca pela maior produção de alimentos em espaços cada vez menores vem causando sérios impactos ambientais pela intensa utilização de agroquímicos no controle de pragas e doenças ou para fertilizar o solo, e que, em razão das características de solubilidade, adsorção, deslocamento, persistência e toxicidade, esses produtos químicos apresentam grande potencial em contaminar solos, águas superficiais e subterrâneas.

A indústria de mineração e de beneficiamento de minérios e as indústrias petroquímicas são responsáveis pelo despejo ou descarga de resíduos químicos letais (mercúrio, benzeno, enxofre) nos solos e rios, causando impactos muitas vezes irreversíveis na saúde das populações residentes na região (RATTNER, 2009).

As áreas contaminadas e degradadas são um problema sério em muitas partes do mundo, exigindo intervenções específicas para sua recuperação. A biodegradação refere-se à transformação de moléculas xenobióticas (compostos químicos não pertencentes a um organismo ou sistema biológico) por microrganismos, e a biorremediação refere-se ao uso de microrganismos para desintoxicar áreas contaminadas. A degradabilidade é vista como um atributo desejável, pois a persistência prolongada leva à contaminação de outros ambientes e de águas subterrâneas (www.embrapa.br, 2024).

Atualmente, o Brasil possui políticas, decretos, resoluções e outras diretrizes nos âmbitos federal, estadual e municipal que guiam nossas ações, de modo a assegurar que o solo, o ar, a água, a fauna e a flora sejam preservados (www.teraambiental.com.br, 2024). A Portaria nº 164, de 28 de dezembro de 2022 estabelece o escopo temático e conceitual de atuação do Ibama na Remediação de Áreas Contaminadas, essa Portaria entrou em vigor em 02 de janeiro de 2023 (www.in.gov.br, 2024).

2.1.1 Contaminação da água

No Brasil, a água é considerada potável se atender aos requisitos estabelecidos no Anexo XX - Do controle e da vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, da Portaria de Consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde (MS). No entanto, essa norma relaciona poucos parâmetros para as denominações “poluentes emergentes” e “micropoluentes”. Essas substâncias são denominadas “emergentes” pelo fato de sua presença ter sido descoberta no ambiente apenas nos últimos anos, o que ocorreu devido às melhorias das técnicas analíticas (SOARES; SOUZA, 2019).

A degradação dos recursos naturais e a contaminação da água por fertilizantes e outros produtos químicos vem crescendo e trazendo graves consequências para o ambiente e para a saúde humana. O crescimento da atividade agropecuária e a perda de sedimentos por meio do escoamento superficial afetam a qualidade das águas superficiais não apenas no local de origem da contaminação, mas também em outros pontos de interferência dos recursos hídricos (MARCHESAN *et al.*, 2009).

A contaminação de águas superficiais e subterrâneas tem um potencial extremamente poluente, pois se, por exemplo, o local onde for aplicado um agrotóxico for próximo a um manancial hídrico que abastece uma cidade, a qualidade dessa água captada também deverá estar comprometida (SOARES; PORTO, 2007).

Cuba *et al.* (2019) avaliaram o processo aeróbio como forma de biorremediação de águas contaminadas por glifosato, assim como a influência da presença de co-substrato, etanol, no processo. Os autores destacaram que levando-se em consideração que em águas superficiais raramente se evidencia a deficiência de fósforo e compostos orgânicos de fácil degradação, a biorremediação do glifosato realizada mediante co-metabolismo possa ser o mecanismo mais predominante, destacando que a presença do co-substrato aumentou a eficiência de degradação de 18,46% para 78,17% partindo de uma concentração inicial de glifosato de 10 mg.L⁻¹.

Lima *et al.* (2015) constataram a eficiência de absorção das raízes da espécie aquática aguapé (*Eichhornia crassipes*) em meio ao óleo lubrificante, que além de absorverem água e nutrientes necessários ao seu desenvolvimento, também são capazes de absorverem certas concentrações do referido contaminante derivado do petróleo e, conseqüentemente, agirem na descontaminação de ambientes aquáticos. O estudo foi realizado por meio da pesagem das plantas utilizadas nos ensaios, considerando o período de crescimento positivo (aumento de biomassa). Os autores concluíram que o processo de fitorremediação é bastante promissor e que, em situações de alto risco ambiental, social e econômico surgidas devido a acidentes envolvendo petróleo e seus derivados em recursos hídricos, a técnica apresentada vem a ser um método eficaz, de baixo custo e sem intervenção brusca no meio, visto que utiliza agentes que ocorrem naturalmente no meio ambiente aquático.

A indústria de mineração e de beneficiamento de minérios e as indústrias petroquímicas são responsáveis pelo despejo ou descarga de resíduos químicos letais

(mercúrio, benzeno, enxofre) nos solos e rios, causando impactos muitas vezes irreversíveis na saúde das populações residentes na região (RATTNER, 2009).

Mariano *et al.* (2007) avaliaram a biorremediação natural da água subterrânea contaminada com óleo diesel em um posto de combustíveis, mediante o monitoramento de indicadores geoquímicos e ensaios laboratoriais de biodegradação. Durante um período de 02 (dois) anos foram realizadas 04 (quatro) coletas de água subterrânea para a avaliação de diversos parâmetros físico-químicos e a concentração de hidrocarbonetos. As análises microbiológicas consistiram na contagem de bactérias heterotróficas totais, na verificação da presença de bactérias hidrocarbonoclasticas e no teste de biodegradabilidade utilizando o indicador redox DCPIP (2,6-diclorofenol-indofenol). Os autores concluíram que foi possível identificar fatores que atestam o emprego da técnica de biorremediação natural para o tratamento da água subterrânea, destacando que a presença de hidrocarbonetos retidos no solo representa uma fonte contínua de contaminação, por isso se faz necessário o monitoramento a longo prazo.

Silva e Fortuna (2021) avaliaram a capacidade do aguapé - *Eichhornia azurea* (Swartz) Kunth - de depurar água contaminada por coliformes termotolerantes. O trabalho de pesquisa foi desenvolvido na Universidade do Estado da Bahia (UNEB), Campus X, Teixeira de Freitas - BA, foi realizada uma coleta da espécie no rio Itanhém. Após o período adaptativo, espécies da planta foram distribuídos em 04 (quatro) diferentes tanques, cada um contendo características distintas de nível de contaminação por coliformes. Foram realizadas coletas da água de cada tanque para análise microbiológica, semanalmente. O método utilizado para testar a hipótese de diferença considerável entre os tanques de tratamento e o tempo de perda de contaminação da água foi a Análise de Variância, utilizando o teste T de *Student*. Os autores constataram a redução das populações de coliformes presentes nos tanques experimentais, em que o decaimento médio de coliformes foi de 3,34895 log NMP/100 mL. Além disso foi realizada a análise do ganho de peso das espécies da planta, que chegaram a um ganho de até 64% do peso inicial. A planta analisada apresentou potencial para uso em técnicas de fitorremediação.

Cardozo *et al.* (2022) analisaram o efeito de inóculos de Microrganismos Eficientes (ME) na biorremediação de água contaminada por dejetos animais, como também, os parâmetros físico-químicos e microbiológicos do fermentado de ME e de água contaminada. Foram investigados os coliformes totais e termotolerantes tanto da água quanto do ME, por meio da técnica do número mais provável (NMP), conhecida como o método de tubos múltiplos; como também, os parâmetros físico-químicos (pH, sólidos totais, sódio, nitrito, nitrato, cloretos, dureza total, cor aparente, condutividade e turbidez) da água contaminada e do ME. Os autores constataram que os parâmetros físico-químicos analisados atenderam aos pré-requisitos do Ministério da Saúde (MS) no que tange a qualidade da água, no entanto, quanto aos parâmetros microbiológicos, 99% das amostras mostraram-se impróprias para o consumo humano e o fermentado de microrganismos eficientes se encontra livre do grupo de coliformes. Quanto a biorremediação utilizando ME, as baixas concentrações de 0,3 a 3 não remediaram o grupo coliformes, no entanto, foi verificado que as concentrações graduais de no mínimo 25% de ME podem remediar até 78% do grupo coliformes.

Santana (2022) desenvolveu um estudo propondo uma abordagem metodológica para prevenção de vazamento de efluente em indústria química. A pesquisa objetivou incentivar as instituições a adotarem posturas assertivas e preventivas, com enfoque na legislação ambiental, qualidade do meio ambiente e responsabilidade

socioambiental, mas também contribuiu na orientação de ações para evitar o aporte de efluentes no solo e em águas subterrâneas, além de apresentar uma sistemática (tarefas organizadas e procedimentadas) para inspeção em canaletas industriais. O método empregado no desenvolvimento do trabalho foi a integração de alguns modelos e ferramentas de gestão (ISO 14001, Gestão de Riscos, ferramenta da qualidade e o ciclo PDCA – *Plan Do Check Act*) que resultou na elaboração de um procedimento para inspeção em canaletas. A inspeção é uma forma de prevenção e que também ajuda na tomada de ações corretivas, caso haja um dano na canaleta que possa causar contaminação no solo e na água.

2.1.2 Contaminação do solo

O solo é um recurso de suma importância para a sobrevivência da vida no planeta Terra, e existe uma grande preocupação com a sua contaminação. O processo de contaminação surge, na maioria das vezes, em função de atividades altamente lucrativas e com um grande impacto ambiental, como é o caso da agropecuária, da mineração e da produção industrial. Os principais poluentes químicos orgânicos associados a essas atividades são: solventes clorados, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PHA) e pesticidas organofosforados. Além disso, poluentes inorgânicos (metais pesados) também estão ligados à essa contaminação (SILVA, 2023).

A degradação de solos por erosão, salinização e o avanço da agricultura irrigada em grande escala, os desmatamentos e a remoção da cobertura vegetal natural, o uso de máquinas pesadas, as monoculturas e o uso de sistemas de irrigação inadequados, além de regimes de propriedades arcaicos, contribuem para a escassez crescente de terras aráveis e, assim, comprometem a segurança alimentar da população mundial (RATTNER, 2009).

No que diz respeito à contaminação no solo, o acúmulo dos agrotóxicos pode fragilizar e desencadear absorção de elementos minerais, principalmente em solos desnudos, concorrendo para a redução do grau de fertilidade do mesmo (SOARES; PORTO, 2007). Com base em sua presença no solo, alimentos, poços e ar, esses compostos podem ser absorvidos por ingestão, contato com a pele, ou inalação (ASMUS *et al.*, 2008).

Toller *et al.* (2021) desenvolveram uma pesquisa para verificar a eficiência da levedura *Saccharomyces cerevisiae* na degradação do herbicida atrazina, em solo contaminado com diferentes concentrações do produto comercial. Foi determinada a quantidade de gás carbônico (CO₂) liberado durante os ensaios, o qual reflete a atividade da microbiota do solo responsável pela degradação de compostos orgânicos. Os autores observaram alta atividade metabólica da levedura até o sétimo dia do experimento e que a atrazina foi totalmente consumida pelas leveduras e pela comunidade microbiana nativa do solo, não sendo mais detectada em 08 (oito) ensaios a partir do 14º dia, sugerindo que a biorremediação com *Saccharomyces cerevisiae* tem potencial para elevar as taxas de degradação desse herbicida no solo.

A atrazina (C₈H₁₄ClN₅) é um herbicida de tipo triazina, usado em plantações de milho, cana-de-açúcar e sorgo para o controle de ervas daninhas. Herbicida antigo, é ainda utilizado devido ao seu baixo custo e porque atua em sinergia quando utilizado com outros herbicidas (BULA ATRAZINA, 2019).

Estrada-Gamboa *et al.* (2023) destacou que o uso indiscriminado de pesticidas altamente tóxicos na agricultura tem produzido contaminação de solos e deterioração dos ecossistemas, e que uma solução promissora para este problema ambien-

tal é a biorremediação, que inclui o uso de bactérias para degradar essas substâncias contaminantes. Nesse trabalho foram realizados o isolamento, identificação e caracterização de cepas bacterianas com capacidade de degradar os pesticidas clorotalonil e clorpirifós, para uso potencial em biorremediação de solos contaminados. Foi isolada uma cepa bacteriana capaz de usar e degradar clorpirifós como fonte de carbono, identificada como *Stenotrophomonas maltophilia* e duas cepas bacterianas com capacidade parcial de utilização do clorotalonil como fonte de carbono, identificadas como *Enterobacter cloacae* e *Ochrobactrum anthropi*. O autor concluiu que as bactérias isoladas possuem potencial biotecnológico a ser incorporado em uma estratégia de biorremediação de solos contaminados, especialmente para eliminação de clorpirifós.

Sousa *et al.* (2020) desenvolveram uma pesquisa sobre os acidentes e vazamentos que envolvem produtos derivados de petróleo que afetam o meio ambiente, prejudicando fortemente o solo. Na busca por remediação, sabe-se que podem ser utilizados processos biológicos sobre a promissora relação custo/eficiência, com a devida consideração de fatores, como o potencial hidrogeniônico (pH) e umidade. Este trabalho teve como objetivo relatar os principais fatores envolvidos e os tipos de técnicas de biorremediação de solos contaminados por petróleo e seus derivados, bem como as principais iniciativas com geração de patentes. Foram identificadas 06 (seis) famílias de patentes, com o primeiro pedido de proteção no Brasil, em 2007, pela Rhodia Poliamida & amp; Especialidades, detendo a maior família de patentes depositadas em sete organizações ou países. É do Brasil a patente para um dispositivo móvel, concedida para o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). Os autores destacaram a viabilidade de aplicação da técnica e a possibilidade de inovações incrementais.

2.1.3 Contaminação do ar

A concentração de gás carbônico (CO₂) na atmosfera é um dos fatores que provocam o efeito estufa. Apesar de amplamente documentado e reconhecido na Convenção das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, realizada no ano de 1992, posteriormente reforçado pelo Protocolo de Quioto em 1997, nenhuma ação concreta foi iniciada, devido à resistência dos Estados Unidos. O aumento do aquecimento global terrestre, em razão do aumento de consumo de combustíveis fósseis na produção de aço, cimento, energia termoelétrica e queimadas de biomassas, causou intensivos danos à camada de ozônio, com severos impactos na saúde das populações afetadas por câncer da pele (RATTNER, 2009).

Moraes *et al.* (2010) reforçaram a relevância do monitoramento da qualidade do ar e da saúde de grupos mais suscetíveis aos efeitos da poluição atmosférica no entorno de unidades industriais, tanto no âmbito da gestão de saúde pública, quanto da gestão de risco e responsabilidade socioambiental da indústria.

2.3 Biorremediação

Dentre as técnicas de descontaminação de ambientes impactados, a biorremediação vem ganhando grande destaque. A biorremediação é uma área da biotecnologia ambiental que pode ser definida como a aplicação de processos biológicos para recuperar áreas contaminadas (BONACINA, 2020).

A biorremediação é um processo já estudado há bastante tempo, com registros desde a década de 1940, apesar de tornar-se popularmente difundida no final

dos anos 1980, quando se tornou realmente necessária devido ao acidente com derramamento de óleo na baía de Prince William, Alasca. A partir de então, esta técnica mostrou-se eficaz e ganhou seu espaço, expandindo exponencialmente com o tempo. No Brasil, a biorremediação ainda é pouco utilizada, porém, pode ser promissora e eficiente. Há casos em que pesquisas nessa área são financiadas por empresas petrolíferas, a exemplo da Petrobras, para desenvolver métodos de biorremediação em casos de derramamento de petróleo e/ou seus derivados (FRANCISCO; QUEIROZ, 2018).

Tortora *et al.* (2017) destacaram que a biorremediação vem sendo utilizada há vários anos em outros países, sendo que as pesquisas iniciaram em 1988. A partir daí vários estudos têm sido conduzidos na tentativa de decompor os diversos tipos de poluentes, por apresentar menor custo e maior eficiência na remoção dos contaminantes do que as técnicas como incineração e lavagem do solo.

Nas técnicas de biorremediação usam-se processos em que organismos vivos, principalmente plantas ou microrganismos, são utilizados tecnologicamente para remover (remediar), degradar (transformar) ou reduzir as concentrações de poluentes no ambiente. Esse processo biotecnológico de remediação ambiental tem sido bastante pesquisado e recomendado pela comunidade científica como uma alternativa viável para o tratamento de ambientes contaminados, como solos, águas subterâneas e águas superficiais, resíduos e efluentes industriais (ABREU *et al.*, 2022).

Os produtos de uma biorremediação eficaz são a água (H_2O) e o dióxido de carbono (CO_2), que não são tóxicos ao meio ambiente (BONACINA, 2020). A biorremediação é a técnica mais comumente utilizada no Brasil, por ser eficiente e economicamente competitiva (CARNEIRO; GARIGLIO, 2010).

O crescimento populacional, industrialização e urbanização são responsáveis pela contaminação dos recursos hídricos e do solo, além do ar. A descontaminação desses locais é difícil e dispendiosa. Uma alternativa viável econômica e ecologicamente é a biorremediação, que consiste no uso de seres vivos, principalmente bactérias e fungos para transformar substâncias tóxicas em compostos inertes, pois os compostos tóxicos servem como fonte de carbono para esses microrganismos. Os microrganismos não possuem todas as rotas enzimáticas catabólicas capazes de degradar todos os compostos novos que a cultura humana sintetiza. Quanto mais próxima é a estrutura química de um xenobiótico à de moléculas naturais, maior a chance de sucesso na biorremediação (FRANCISCO; QUEIROZ, 2018).

A aplicação de tecnologias de biorremediação enfrenta muitos desafios significativos, incluindo a seleção de microrganismos adequados, otimização das condições ambientais (pH, umidade) e custos associados.

2.3.1 Principais agentes da biorremediação

Vários organismos podem ser utilizados na biorremediação, como bactérias, fungos ou plantas e a eficiência de um ou outro depende, em muitos casos, da estrutura da molécula e da presença de enzimas hábeis em degradar o produto, as quais apresentam especificidade para a maioria dos substratos (PEREIRA; FREITAS, 2012).

Os estudos de degradação de compostos químicos têm mostrado vários microrganismos extremamente versáteis em catabolizar moléculas recalcitrantes. Trabalhos atuais em biotecnologia indicam fungos e bactérias como principais microrganismos eficientes na degradação de poluentes, possuindo alto potencial na recuperação de ambientes contaminados (BALAN, 2002).

Os acidentes com produtos xenobióticos (produzidos pelo homem) como derramamento de petróleo e biocombustíveis são extremamente poluentes aos recursos hídricos, além de terem efeitos nocivos e/ou mutagênicos aos organismos vivos, podendo levar à eliminação seletiva de indivíduos e acarretar modificações na estrutura ecológica e funcional da comunidade biológica (GAYLARDE *et al.*, 2005).

2.3.2 Técnicas de biorremediação

De acordo com Moreira e Siqueira (2006) as técnicas de biorremediação são divididas da seguinte forma: a) passiva (degradação natural por microrganismos do solo); b) bioestimulação (adição de nutrientes no solo para estimular a degradação passiva); c) bioventilação (uso de gases na bioestimulação); d) bioaumentação (inoculação no solo, com microrganismos selecionados); e) *landfarming* (aplicação de rejeitos com inóculos na superfície do solo, com posterior gradagem) e f) compostagem (construção de pilhas de resíduos com inoculantes).

As técnicas de remediação *in situ* são aquelas em que não há necessidade de remoção do material, sendo esta realizada no próprio local contaminado. Segundo Pereira e Freitas (2012) isto evita custos e distúrbios ambientais sendo associados com o movimento de solos e águas que estão contaminados, para outros locais destinados ao tratamento. Entre as técnicas mais utilizadas nos processos *in situ* na biorremediação encontram-se a passiva ou intrínseca, bioestimulação, bioaumentação, *air sparging* e bioventilação, conforme mecanismos descritos no Quadro 1.

Quadro 1 – Mecanismos das técnicas de biorremediação *in situ*

TÉCNICAS DE BIORREMEDIAÇÃO	MECANISMOS
Biorremediação intrínseca ou passiva	Processo que ocorre naturalmente, em que os microrganismos autóctones, do próprio local, sem qualquer interferência de tecnologias ativas de remediação, transformam os contaminantes em substâncias menos tóxicas (BENTO <i>et al.</i> , 2003)
Bioestimulação	Consiste na adição de nutrientes orgânicos e inorgânicos no local contaminado, visando estimular a atividade dos microrganismos degradadores (JACQUES <i>et al.</i> , 2007)
Bioaumentação	Ocorre por meio da inoculação de microrganismos com alto potencial de degradação em um local contaminado (MARIANO <i>et al.</i> , 2007)
<i>Air Sparging</i>	Esta tecnologia se dá através do ar, em que é injetado na zona saturada, usualmente abaixo da zona contaminada, no qual o vapor utilizado em forma de pressão positiva empurra os contaminantes do solo para a atmosfera, promovendo a biodegradação dos contaminantes pela atividade bacteriana aeróbica (WEBER; SANTOS, 2013)
Bioventilação	Técnica que se caracteriza pela adição de oxigênio no solo contaminando, para estimular o crescimento dos microrganismos naturais e/ou introduzidos pela bioaumentação (REGINATTO <i>et al.</i> , 2012)

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Na tecnologia *ex situ* o material contaminado é retirado do local de origem, para posterior tratamento. É uma técnica de fácil controle e apresenta uma maior

versatilidade para o tratamento de vários tipos de contaminantes. Entre as técnicas mais utilizadas nos processos *ex situ* encontram-se o *landfarming*, biorreatores compostagem, conforme mecanismos descritos no Quadro 2.

Quadro 2 – Mecanismos das técnicas de biorremediação *ex situ*

TÉCNICAS DE BIORREMEDIAÇÃO	MECANISMOS
<i>Landfarming</i>	Corresponde ao método de tratamento em que um substrato orgânico de um resíduo é degradado biologicamente na camada superior do solo (CARNEIRO; GARIGLIO, 2010) A técnica usa oxigênio, geralmente do ar, para estimular o crescimento e reprodução das bactérias aeróbias que, por sua vez, degradam os constituintes do solo. Esta estimulação ocorre por meio do revolvimento do solo por operações de aeração e gradagem, além da adição de corretivos e fertilizantes (MAILA; CLOETE, 2004)
Biorreatores	Consiste em tanques aéreos fechados, onde o solo contaminado é misturado com água, de modo a formar uma suspensão com 10 a 40% de sólidos, que é mecanicamente aerada por meio de rotações. A formação desta suspensão no interior do biorreator possibilita o aumento da disponibilidade dos contaminantes aos microrganismos degradadores e a eliminação da heterogeneidade da distribuição dos contaminantes no solo (MACLEOD; DAUGULIS, 2005)
Compostagem	Para a realização da compostagem em forma de bio-pilhas, o solo é removido do local de origem e colocado na forma de pilhas, em um local que permita o controle da lixiviação e do escoamento superficial dos líquidos originados dessas pilhas (JACQUES <i>et al.</i> , 2007)
Fitorremediação	A técnica de fitorremediação consiste na utilização de plantas que possuem capacidade de absorver elementos do solo com teores excessivos de metais e outros elementos potencialmente tóxicos ao meio, promovendo sua descontaminação (SOUZA <i>et al.</i> , 2011)

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

2.4 Biorremediação e nanotecnologia

A remediação de solo e água contaminados é um tema relevante, sendo foco de intensas pesquisas. O uso de nanopartículas para degradar contaminantes tem se consolidado como uma tecnologia de remediação sustentável, com resultados promissores em todo o mundo. Estudos recentes têm mostrado que a combinação entre a biotecnologia e os nanomateriais pode ser uma estratégia promissora para a remoção, estabilização e degradação de poluentes presentes nos solos contaminados (MANFRON *et al.*, 2020).

Os primeiros trabalhos usando nanopartículas metálicas para descontaminação de águas subterrâneas contaminadas com organoclorados foram realizados na década de 1990, pelos pesquisadores Wang e Zhang, que sintetizaram em laboratório, em escala nano, partículas bimetálicas de paládio/ferro (Pd/Fe), paládio/zinco (Pd/Zn), platina/ferro (Pt/Fe), níquel/ferro (Ni/Fe) e as aplicaram por meio de teste de

bancada, para remediação de diversos poluentes clorados e alguns organoclorados aromáticos. Os autores concluíram que ocorria uma rápida e completa degradação dos poluentes pelo uso das nanopartículas, observando-se, pela primeira vez, que dentro dos elementos bimetálicos estudados os metais Fe e Zn serviam primeiramente como doadores de elétrons, enquanto os metais Pd, Ni e Pt como catalisadores (SILVA, 2023).

Muitos estudos estão sendo realizados a fim de entender como as nanopartículas reagem com o contaminante e migram em um meio poroso. Estes estudos estão sendo realizados em laboratório por meio de ensaios em coluna, os quais são importantes para avaliar como é a interação do contaminante com as nanopartículas e, também, para se ter ideia da sua mobilidade. No entanto, existem poucos dados obtidos em pesquisas que avaliaram de forma sistemática o transporte de nanopartículas em escala de campo (TOSCO *et al.*, 2014).

O uso de nanopartículas para degradar contaminantes tem se consolidado como uma tecnologia de remediação sustentável com o surgimento de nanopartículas de ferro de valência zero (nZVI) que, pelas suas propriedades, demonstram ser um importante elemento a ser utilizado em técnicas de remediação, além de serem eficientes e de baixo custo. Manfron *et al.* (2020) destacaram a viabilidade para que as pesquisas se intensifiquem ainda mais, devido à eficiência deste nanomaterial sobre poluentes presentes em solos e águas, sendo importante ampliar os estudos em solos brasileiros, já que a maioria das pesquisas é internacional e não é possível transferir diretamente o conhecimento adquirido de solos temperados para solos residuais de clima tropical e subtropical.

Malinoski e Maranhão (2020) desenvolveram uma pesquisa com o objetivo de analisar a eficiência na degradação de petróleo por consórcio bacteriano imobilizado constituído por três bactérias identificadas e previamente isoladas da rizosfera de *Echinochloa polystachya* (KUNTH) HITCHC. As bactérias, denominadas como “Amarela”, “Branca” e “Mostarda”, foram identificadas e formaram a composição de um consórcio biodegradador. Esse consórcio foi imobilizado por encapsulação em alginato, e revestido por uma solução de nanoquitosana, visando o intuito de aumentar a superfície de contato entre cápsula e poluente, otimizando a velocidade da cinética da reação de quebra do poluente pelo consórcio. Os testes de degradação e viabilidade comprovaram que o consórcio degrada o petróleo de forma efetiva e gradativa, e ainda com o potencial da formação de biossurfactantes. O uso de nanotecnologia foi destaque como uma inovação para a formulação desse novo revestimento para melhoria do processo e geração de um produto sustentável para a biorremediação de meios contaminados.

3. METODOLOGIA

Este trabalho é referente a uma revisão bibliográfica pautada em artigos científicos, bem como mídias impressas, tais como: jornais, revistas e periódicos. Os artigos, teses, dissertações e monografias foram obtidos em bibliotecas digitais de Universidades e *sites* de pesquisa, como: SciELO e Google Acadêmico. No campo de busca foi inserido o termo “biorremediação” e “microrganismos”. A pesquisa é considerada de natureza exploratória quando se trata de investigação bibliográfica com o objetivo de explorar e compreender as contribuições científicas das técnicas de biorremediação e recuperação de áreas degradadas. Foi realizada a revisão bibliográfica com a análise dos autores dos estudos de casos relevantes.

4 CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo destacam a importante contribuição científica das técnicas de biorremediação para a descontaminação e recuperação de áreas degradadas. Embora existam desafios, vantagens ambientais e a sustentabilidade dessas técnicas fazem delas uma opção promissora para a remediação ambiental. Investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento, bem como a integração de diferentes abordagens, são essenciais para maximizar seu potencial.

A ampliação da pesquisa no Brasil, utilizando nanopartículas, poderá trazer novas possibilidades, minimização de custos, maior segurança e efetivação de ações para ampliar as atividades de remediação de solos e águas contaminadas, trazendo melhores perspectivas à questão ambiental.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, M.; MARIOTTI, Z. **A biorremediação como ferramenta para a minimização de problemas ambientais**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola de Agricultura Luiz de Queiroz, 2003.
- ABREU, C.; ABREU, M. F.; BERTON, R. S. Análise química de solo para metais pesados. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 2, p.645-692, 2002.
- ANDRADE, J. A.; AUGUSTO, F.; JARDIM, I. C. S. F. Biorremediação de solos contaminados por petróleo e seus derivados. **Eclet. Quím.**, 35 (3), set. 2010.
- ASMUS, C. I. R. F.; ALONZO, H. G. A.; PALÁCIOS, M.; SILVA, A. P.; FILHOTE, M. I. F.; BUOSI, D.; CÂMARA, V. M. Avaliação de risco à saúde humana por resíduos de pesticidas organoclorados em Cidade dos Meninos, Duque de Caxias, Rio de Janeiro, Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, Rio de Janeiro - RJ, v. 24, n.4, p.755-766, 2008.
- BALAN, D. S. L. A indústria têxtil e o meio ambiente. Tecnologia Limpa e controle ambiental. **Química Têxtil**, Barueri, v. 66, p. 26-31, 2002.
- BENEVIDES, J. A. J.; MARINHO, G. Degradação de pesticidas por fungos: uma revisão. **Holos**, v. 2, p. 110-129, 2015.
- BENTO, F. M.; CAMARGO, F. A. O.; OKEKE, B.; FRANKENBERGER-JÚNIOR, W. T. Biorremediação de solos contaminados por óleo diesel. **Environmental and Soil Microbiology. Braz. J. Microbiol.**, 34 (1), nov. 2003.
- BONACINA, D. Y. **Principais técnicas de biorremediação de áreas contaminadas por glifosato na microrregião de Dourados MS**. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química, 2020.

BULA ATRAZINA SD 500 SC. **Sharda Herbicidas**, 2019. Disponível em: <https://www.adapar.pr.gov.br>. Acesso em: 10 de out. 2024.

BURATINI, S. V. **Biodegradação. ecotoxicologia aquática, princípios e aplicações**, 2ª edição, São Carlos: RiMa, p. 89-116, 2008.

CARDOZO, N. C. G. S.; SANTOS, R. C.; SOUZA, G. S.; SANTOS, L. S.; LOPES, E. A. P.; CAVALCANTI, J. C. M. Estudos preliminares de microrganismos eficientes (EM) na biorremediação da água da barragem da vila Bananeira em Arapiraca - Alagoas, Brasil. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 3, 2022.

CARNEIRO, D. A.; GARIGLIO, L. P. A biorremediação como ferramenta para a descontaminação de ambientes terrestres e aquáticos. **Revista Tecer**, Belo Horizonte, v. 3, n. 4, 2010.

CETESB: COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Conceitos e definições**, 2021. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br>. Acesso em: 10 de out. 2024.

COLLA, L. M.; PRIMAZ, A. L.; LIMA, M.; BERTOLIN, T. E.; COSTA, J. A. V. Isolamento e seleção de fungos para biorremediação a partir de solo contaminado com herbicidas triazínicos. Ciências Agrárias. **Ciênc. Agrotec.**, 32 (3), jun., Lavras - MG, v. 3, p. 809-313, 2008.

COSTA, A. H. R.; NUNES, C. C.; CORSEUIL, H. X. **Biorremediação de águas subterrâneas impactadas por gasolina e etanol com o uso de nitrato**. Engenharia Sanitária Ambiental, Rio de Janeiro - RJ, v. 14, n. 2, p. 265-274, 2009.

COSTA, E. T. S.; GUILHERME, L. R. G.; CURI, N.; OLIVEIRA, L. C. A.; VISIOLI, E. L.; LOPES, G. Subproduto da indústria de alumínio como amenizante de solos contaminados com cádmio e chumbo. Poluição do solo e qualidade ambiental. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, 32 (6), dez. 2008.

CUBA, R. M. F.; CINTRA, T. S.; PAIVA, D. C. C., TÉRAN, F. J. C. Influência do etanol como cosubstrato na biorremediação de água contaminada com formulação comercial à base de glifosato. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 5(24), 2019.

ESTRADA-GAMBOA, J; UMAÑA-CASTRO, R; SANCHO-BLANCO, C.; OROZCO-ACEVES, M. Isolamento, identificação e caracterização de cepas bacterianas com potencial para decompor os agrotóxicos clorotalonil e clorpirifós. **Quim. Nova**, v. 46, n. 2, p. 179-184, set. 2023.

FRANCISCO, W. C.; QUEIROZ, T. M. **Biorremediação**, v. 15. ISSN 1982-2278, 2018.

GAYLARDE, C. C.; BELLINASSO, M. L.; MANFIO, G. P. Biorremediação. **Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento**, n. 34, p. 36-43, 2005. Disponível em: <http://www.cocminas.com.br>. Acesso em: 3 out. 2024.

HUANG, X. D.; EL-ALAWI, Y.; GURSKA, J.; GLICK, B. R.; GREENBERG, B. M. A multi-process phytoremediation system for decontamination of persistent total petroleum hydrocarbons (TPHs) from soils. **Microchemical Journal**, v. 81, n. 1, p. 139-147, 2005.

JACQUES, R. J. S.; OKEKE, B. C.; BENTO, F. M.; PERALBA, M. C. R.; CAMARGO, F. A. O. Caracterização de um consórcio microbiano degradador de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos de um local de landfarming de lodo petroquímico. **Revista de Biorremediação**, v.11, n.1, p.1-11, 2007.

LIMA, J. G.; PAINS, I. F.; MORAES, L. C.; BORGES, L. N.; LOPES, Y. O. FERREIRA, D. C., 2015. **Biorremediação de águas contaminadas por derivados de petróleo com o uso de plantas**. Disponível em: <https://editoraessentia.iff.edu.br>. Acesso em: 21 set. 2024.

MACLEOD, C. T.; DAUGULIS, A. J. Interfacial effects in a two-phase partitioning bioreactor: degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) by a hydrophobic *Mycobacterium*. **Process Biochemistry**, Oxon, v. 40, n. 5, 2005.

MAILA, M. P.; CLOETE, T. E. Biorremediação de hidrocarbonetos de petróleo por meio de agricultura terrestre: simplicidade e custo-efetividade são as únicas vantagens?, 2004, **Environ. Sci. Biotechnol**, 3, p. 349–360, 2004. Disponível em: <https://link.springer.com>. Acesso em: 13 out. 2024.

MALINOSKI, L.; MARANHO, L. T. Imobilização de consórcio de bactérias extraídas da rizosfera de *Echinochloa polystachya* (KUNTH) HITCHC., Poaceae, e seu potencial para a degradação de petróleo. **Braz. J. of Develop.**, Curitiba - PR, v. 6, n. 7, p. 50373-50395, jul. 2020.

MANFRON, S.; THOMÉ, A.; CECCHIM, I.; REDDY, K. R. Aplicação de nanopartículas de ferro zero-valente (nFeZ) na remediação de solos e águas subterrâneas contaminadas: uma revisão. **Quím. Nova**, 43 (5), mai. 2020.

MARCHESAN, E.; SARTORI, G. M. S.; REIMCHEIV, G. B.; AVILA, L. A.; ZANELLA, R.; MACHADO, S. L. O.; MACEDO, V. R. M.; COGO, J. P. Qualidade de água dos rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **Ciência Rural**, Santa Maria - RS, v. 39, n. 7, p. 2050-2056, out. 2009.

MARIANO, A. P.; ANGELIS, D. F. A; BONOTTO, D. M. Monitoramento de indicadores geoquímicos e avaliação de biodegradação em área contaminada com óleo diesel. **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 12, n. 3, p. 296-304, jul/set 2007.

MARQUES, M.; AGUIAR, C. R. C; SILVA, J. J. L. S. Desafios técnicos e barreiras sociais, econômicas e regulatórias na fitorremediação de solos contaminados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa - MG, v. 35, n. 1, p. 643-652, 2011.

MORAES, A. C. L.; IGNOTTI, E.; NETTO, P. A.; JACOBSON, L. S. V.; CASTRO, H.; HACON, S. S. Sibilância em crianças e adolescentes vizinhos a uma indústria petroquímica no Rio Grande do Norte, Brasil. **Jornal de Pediatria**, v. 86, n. 4, p. 337-44, 2010.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2ª ed. Lavras: UFLA, p. 729, 2006.

PAUDYN, K.; RUTTER, A.; ROWE, R.K.; POLAND, J.S. Remediação de hidrocarbonetos com solos contaminados no ártico canadense por landfarming. **Regiões Frias Ciência e Tecnologia**, v. 53, n. 1, p. 102-114, 2007.

PEREIRA, A. R. B.; FREITAS, D. A. F. Uso de microorganismos para a biorremediação de ambientes impactados. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria - RS, v. 6, p. 975-1006, 2012.

RATTNER, H. Meio ambiente, saúde e desenvolvimento sustentável. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 14, n. 6, p. 1965-1971, 2009.

REGINATTO, C.; THOMÉ, A.; COLLA, L. M.; MENEGHETTI, L. R. R., CECCHIN, I. Biorremediação de um solo argiloso contaminado com uma mistura de diesel e biodiesel através da bioventilação. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, Paraná, v. 1, p. 43-58, 2012.

RIZZO, A. C. L.; LEITE, S. G. F.; SORIANO, A. U.; SANTOS, R. L. C.; SOBRAL, L. G. S. **Biorremediação de solos contaminados por petróleo: ênfase no uso de biorreatores**. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Ambiental (CETEM)/Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), 76 p., 2007.

SANTANA, J. A. **Proposta metodológica para prevenção de vazamento de efluentes em indústria química a partir de estudo de caso**. Monografia (MBA em Gestões de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields), Escola politécnica da Universidade de São Paulo, 52 p., São Paulo – SP, 2022.

SILVA, L. **Biorremediação e nanotecnologia: uma combinação promissora no tratamento de solos contaminados**, 2023. Disponível em: <https://www.each.usp.br>. Acesso em: 12 de out. 2024.

SILVA, T. L.; FORTUNA, J. L. Capacidade de *Eichhornia azurea* (Swartz) Kunth de depurar água contaminada por coliformes termotolerantes. **Scientia Plena**, v. 17, n. 10, 2021.

SOARES, A. F. S. S.; SOUZA, L. P. S. Das águas de abastecimento público por poluentes emergentes e o direito à saúde. **R. Dir. Sanit.**, São Paulo, v. 20, n. 2, p. 100-133, jul./out. 2019.

SOARES, W. L., PORTO, M. F. Atividade agrícola e externalidade ambiental: uma análise a partir do uso de agrotóxicos no cerrado brasileiro. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 12, n. 1, p. 131-143, 2007.

SOUSA, K. C. S., SANTOS JÚNIOR, J. E.; SANTOS, V. M. L. Estudo prospectivo sobre o uso da técnica de biorremediação para a recuperação de solos contaminados por derivados do petróleo. **Cadernos de Prospecção – Salvador**, v. 13, n. 3, p. 795-804, jun. 2020.

SOUZA, L. A. D.; ANDRADE, S. A. L. D.; SOUZA, S. C. R. D.; SCHIAVINATO, M. A. Tolerância e potencial fitorremediador de *Stizolobium aterrimum* associada ao fungo micorrízico arbuscular *Glomus etunicatum* em solo contaminado por chumbo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa - MG, v. 35, n. 3, p. 1441-1451, 2011.

TAVARES, S. **Fitorremediação em solo e água de áreas contaminadas com metais pesados provenientes da disposição de resíduos perigosos**. Tese (Programa de Engenharia Civil). Rio de Janeiro - RJ: UFRJ, p. 415, 2009.

TOLLER, N.; GUIMARÃES, E.; BRAVO, C. Biodegradação do herbicida atrazina por *Saccharomyces cerevisiae*. **Eng. Sanit. Ambient.**, 26 (4), jul/aug. 2021.

TORTORA, G. J., FUNKE, B. R.; CASE, C. L. **Microbiologia: uma introdução**. Editora Benjamin Cummings, 12^a ed., 2017.

TOSCO, T.; PAPINI, M. P.; VIGGI, C. C.; SETHI, R.; J. **Cleaner Prod.**, 77, 10, 2014.

WEBER, B. D.; SANTOS, A. A. **Utilização da biorremediação como ferramenta para o controle da degradação ambiental causada pelo petróleo e seus derivados**. Engenharia Ambiental, Espírito Santo do Pinhal, v. 1, p. 114-133, 2013.

<https://www.embrapa.br>, 2024

<https://www.in.gov.br>. Acesso em: 12 set. 2024

<https://www.teraambiental.com.br>. Acesso em: 21 out. 2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela força e sabedoria durante toda essa jornada.

A meus pais, pelo amor, apoio incondicional e incentivo constante.

Aos meus colegas de curso, pela parceria e momentos de aprendizado compartilhados.

Aos professores e professoras do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, por todo o conhecimento repassado.

A minha orientadora, professora Lígia Ribeiro pela orientação, paciência e comprometimento, fundamentais para a realização deste trabalho.

As professoras Ysa Helena (DESA) e Vera Lúcia (DQ) por terem aceitado participar da avaliação do meu trabalho de conclusão de curso.