

# MICROORGANISMOS UTILIZADOS NA BIORREMEDIAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS POR HIDROCARBONETOS DERIVADOS DE PETRÓLEO – REVISÃO DE LITERATURA

## MICROORGANISMS USED IN THE BIOREMEDIATION OF SOILS CONTAMINATED BY PETROLEUM-DERIVATIVE HYDROCARBONS – LITERATURE REVIEW

Taciana Rodrigues de Oliveira<sup>1</sup>  
Fernando Santos<sup>2</sup>

### RESUMO

O petróleo é um combustível fóssil altamente poluente, composto por hidrocarbonetos, usado amplamente como fonte de energia e matéria-prima na produção de diversos produtos. No entanto, sua exploração e uso têm graves impactos ambientais. O petróleo e seus derivados são altamente tóxicos e contaminantes, prejudicando o solo, a água e o ar, e causando danos à saúde humana, à fauna, à flora e aos ecossistemas. Para combater esses problemas, a biorremediação se destaca como uma alternativa eficaz no tratamento de solos contaminados. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar e discutir os principais microrganismos utilizados na biorremediação de solos contaminados por hidrocarbonetos derivados do petróleo. A pesquisa utilizou a abordagem bibliométrica, com busca de fontes científicas nas bases de dados *Scopus Preview* e *Web of Science (WoS)*, consideradas as maiores bases de periódicos acadêmicos. A biorremediação emprega uma variedade de microrganismos e consórcios para reduzir ou eliminar os contaminantes. A diversidade de estudos sobre a relação entre microrganismos e seu potencial de degradação é fundamental para determinar a técnica de biorremediação mais adequada em cada situação específica. No entanto, a maioria desses estudos se concentra em abordagens *ex situ*, onde é mais fácil controlar os fatores que interferem no processo. Portanto, é recomendado que sejam realizados estudos de biorremediação *in situ* para avaliar sua eficiência e limitações. Isso proporcionará uma melhor compreensão da aplicação prática da biorremediação e sua viabilidade como solução para a remediação de solos contaminados por derivados de petróleo.

**Palavras-chave:** Biorremediação. Hidrocarbonetos. Petróleo. Microrganismos.

### ABSTRACT

Petroleum is a highly polluting fossil fuel, composed of hydrocarbons, widely used as a source of energy and raw material in the production of various products. However, its exploitation and use have serious environmental impacts. Petroleum and its derivatives are highly toxic and polluting, damaging the soil, water and air, and causing damage to human health, fauna, flora and ecosystems. To combat these problems,

---

<sup>1</sup> Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS). Email: taciana-oliveira@uergs.edu.br.

<sup>2</sup> Professor Doutor da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul. (UERGS).  
Email: fernando-santos@uergs.edu.br

bioremediation stands out as an effective alternative in the treatment of contaminated soils. In this context, this study aimed to evaluate and discuss the main microorganisms used in the bioremediation of soils contaminated by hydrocarbons derived from petroleum. The research used the bibliometric approach, with a search for scientific sources in the Scopus Preview and Web of Science (WoS) databases, considered the largest databases of academic journals. Bioremediation employs a variety of microorganisms and consortia to reduce or eliminate contaminants. The diversity of studies on the relationship between microorganisms and their degradation potential is essential to determine the most appropriate bioremediation technique in each specific situation. However, most of these studies focus on *ex situ* approaches, where it is easier to control the factors that interfere with the process. Therefore, it is recommended that *in situ* bioremediation studies be carried out to assess its efficiency and limitations. This will provide a better understanding of the practical application of bioremediation and its viability as a solution for the remediation of soils contaminated by petroleum derivatives.

**Keywords:** Bioremediation. Hydrocarbon. Petroleum. Microorganisms.

## 1 INTRODUÇÃO

O petróleo é um combustível fóssil composto principalmente por hidrocarbonetos, sendo uma das fontes de energia mais utilizadas na atualidade e matéria-prima para a fabricação de diversos produtos como gasolina, éteres, benzeno, lubrificantes, vaselinas, parafinas, graxas, asfaltenos, piche, óleo diesel, gás natural e GLP (Gás Liquefeito de Petróleo) mais conhecido como gás de cozinha e o querosene. Entretanto, este combustível possui grande potencial de contaminação no meio ambiente. Somado a isso, temos as atividades industriais e agrícolas que contribuem para o descarte desses poluentes (CHEN *et al.*, 2015).

O petróleo tem principalmente efeitos ambientais negativos devido à sua toxicidade em quase todos os tipos de vida. A poluição do ar e da água por petróleo e seus derivados pode ser prejudicial e perigosa para a saúde das pessoas (MOKIF; JASIM; ABDULHUSAIN, 2022). O solo e a água contaminados por hidrocarbonetos derivados de petróleo afetam drasticamente a saúde humana e de outros organismos vivos. Alguns resíduos de petróleo são voláteis e afetam a qualidade do ar e causam outros tipos de poluição do ar, ou seja, *smog*, sendo necessário formular estratégias antipoluição do ar. A disponibilidade de hidrocarbonetos e resíduos de petróleo no ar também pode causar alergias nasais e de garganta, vômitos e afetar significativamente os pulmões de humanos e outros organismos vivos. A exposição a uma alta concentração de hidrocarbonetos pode causar distúrbios pulmonares malignos e não malignos (SATTAR, 2022).

Os Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (PAHs) presentes na composição do petróleo são altamente poluentes e de difícil degradação, causando efeitos danosos ao meio ambiente. Essas substâncias, como benzeno e tolueno, ficam acumuladas no solo e contaminam a fauna e a flora. Quanto à fauna marinha, pode ocorrer, dentre outros efeitos, danos ao DNA, redução do crescimento e surgimento de malformações e, também, mudança da estrutura etária das populações devido à perda de peixes mais jovens. Em ecossistemas terrestres, o óleo pode se acumular nas penas e até mesmo no fígado de aves. Além disso, ocorre prejuízo na ação fotossintética de plantas em manguezais (EUZEBIO; RANGEL; MARQUES, 2019).

Uma alternativa para minimizar esse problema ambiental, especialmente nos solos, é a biorremediação. Esta técnica consiste em utilizar microrganismos para degradar, bioadsorver ou bioacumular os compostos poluentes, revertendo os danos causados pela contaminação, sendo uma técnica de baixo custo em relação a outras existentes. Além disso, nos solos já há uma grande diversidade de microrganismos favorecendo-a entre as demais (SOUSA *et al.*, 2020).

A biorremediação é definida como a técnica que utiliza microrganismos para bioadsorver, bioacumular ou degradar os compostos poluentes, revertendo os danos causados pela contaminação. Em geral, demanda maior monitoramento (pH, temperatura, aeração, nutrientes) e manutenção do local, mas ainda assim é considerada uma técnica de baixo custo e vantajosa em relação a outras existentes pelos motivos que seguem: a) nos solos já há uma grande diversidade de microrganismos favorecendo-a entre as demais técnicas; b) os subprodutos gerados na remediação não necessitam de tratamento específico (biomassa e água) e c) pode ser implantado tanto em *in situ* quanto *ex situ* (CORIOLANO; FILHO, 2016).

Em um levantamento de projetos de biorremediação realizado por Orellana *et al.* (2022), o custo da biorremediação era altamente variável e variava entre US\$ 0,5 e US\$ 1.820 por m<sup>3</sup> de solo tratado. Em geral, os projetos de custo mais baixo eram baseados em bioventilação e bioestimulação e os mais caros envolviam complemento por técnicas físico-químicas mais agressivas, como tratamentos térmicos e extração de vapor de solvente.

Basicamente, a biorremediação se dá por meio de dois processos: a bioestimulação, que está relacionada a adição de nutrientes para favorecimento de microrganismos autóctones degradadores; e a bioaumentação, que envolve a introdução de microrganismos, que pode ser realizada: a) com a introdução de Organismos Geneticamente Modificados (OGM); b) com o isolamento e seleção de microrganismos autóctones (nativas) com propriedades de interesse a partir de amostras do ambiente a ser tratado; ou c) com seleção de microrganismos alóctones (não nativas) com as propriedades de interesse a partir de matéria *ex situ* disponível em coleções de culturas ou outras fontes (CHEN *et al.*, 2015; MAITRA, 2018b).

Dessa maneira, este trabalho teve por objetivo avaliar e discutir os principais microrganismos utilizados na técnica de biorremediação para remediação de solos contaminados por hidrocarbonetos derivados de petróleo. Para tanto, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos: a) levantar os estudos realizados de microrganismos empregados em processos de biorremediação por hidrocarbonetos; b) compilar os principais resultados dos estudos realizados; e consolidar os dados dos resultados dos estudos realizados.

## 2 METODOLOGIA

A pesquisa foi realizada empregando como estratégia metodológica a abordagem bibliométrica, onde a coleta de dados foi realizada em janeiro de 2023.

Para a busca de fontes científicas, utilizou-se as bases de dados *Scopus Preview* e *Web of Science (WoS)*, visto que ambas são consideradas como as maiores bases de periódicos acadêmicos.

Como palavras-chave, foram utilizados os termos em inglês *bioremediation AND hydrocarbons AND microorganisms*. A busca por esses termos abrangeu os títulos (article title), resumo (abstract) e palavras-chave (keywords) (Figura 1).

Para tanto se utilizaria os descritores: biorremediação, hidrocarbonetos de petróleo e microrganismos. Os dados coletados para a investigação compreendem o período de 2016 a 2022 (Figura 2).

Figura 1 - Número de publicações classificadas por assunto/palavras-chave utilizando os descritores biorremediação, microrganismos e hidrocarbonetos de petróleo, em busca na base de dados *Web of Science*, no período entre 2016 e 2022.



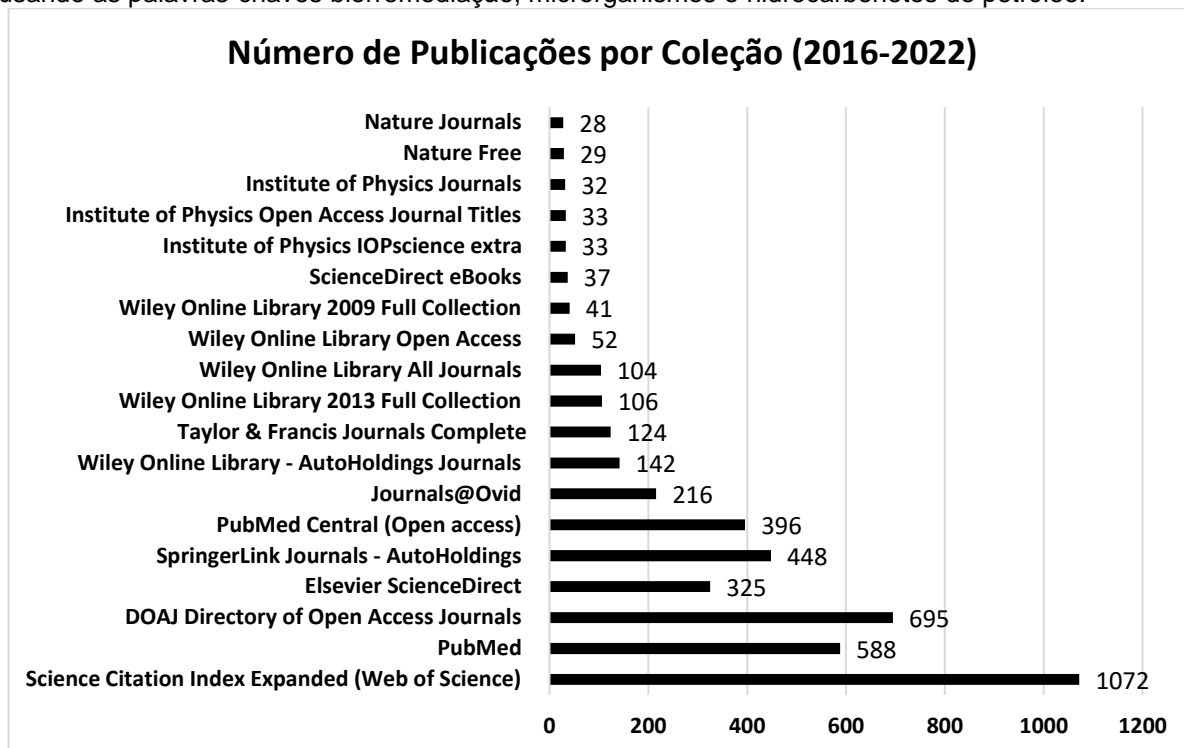
Fonte: Autora (2023)

Existem diversos trabalhos que apontam microrganismos utilizados na degradação de áreas contaminadas, no entanto, pouca informação disponível sobre as relações entre as taxas de degradação de hidrocarbonetos em solo contaminado com petróleo e população microbológica e atividade em ensaios de laboratório. Além disso, muitos dos estudos de bioremediação são realizados *ex situ*, mas grande parte da demanda seriam de técnicas *in situ* (LOVLEY, 2003).

Já Silva (2022) apresentou resultados de sequenciamento genômico de microrganismos oriundos de fontes de petróleo onde foi observado que estes adquiriram resistência no decorrer do tempo e por isso apresentam ótimas condições como biodegradadores em relação a microrganismos obtidos de outras fontes.

Com intuito de facilitar futuros trabalhos relacionados ao tema, de uma técnica considerada vantajosa, mas ainda não muito empregada, para um contaminante muito comum, pretende-se compilar dados de estudos já realizados, relacionando os microrganismos e outras informações relevantes.

Figura 2 - Número de publicações entre o período de 2016 e 2022 na plataforma *Web of Science*, usando as palavras-chaves biorremediação, microrganismos e hidrocarbonetos de petróleo.



Fonte: Autora (2023)

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 CONTAMINAÇÃO POR DERRAMAMENTO DE PETROLEO

Com o caminhar da humanidade as tecnologias têm se desenvolvido cada vez mais, assim como o mundo globalizado se diversifica a uma velocidade estrondosa. Somado a isso o aumento da população, assim como a necessidade pela geração de alimentos, e conseqüentemente ligado a esses fatores a geração de poluição têm aumentado exponencialmente como o passar dos anos (PETERS *et al.*, 2020).

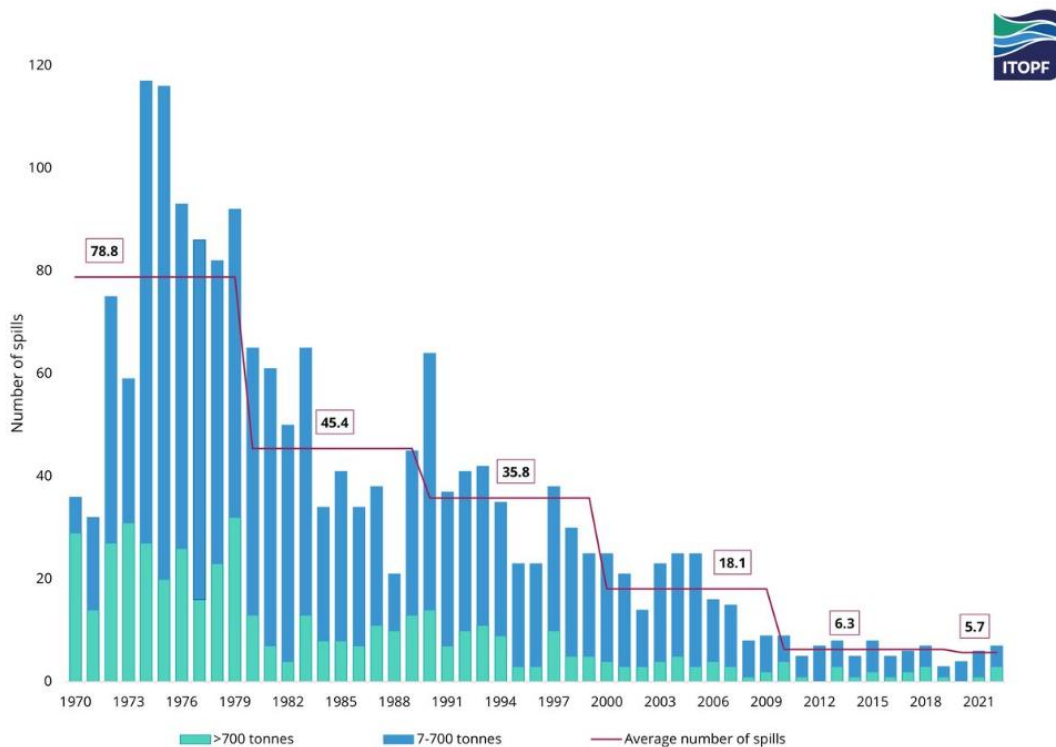
Contudo, a poluição tornou-se uma preocupação global devido à contaminação do ambiente com compostos indesejáveis e ao efeito negativo que esses poluentes causam não somente no ambiente, mas também na saúde humana (MARTINS *et al.*, 2015). Atualmente, inúmeras pesquisas relacionadas à remediação de áreas atingidas por acidentes envolvendo produtos petroquímicos são realizadas com a finalidade de restaurar a qualidade dos solos (COSTA, 2011).

Com o avanço de tecnologias e a crescente globalização, cresceu demasiadamente o aumento da exploração e conseqüentemente do consumo de combustíveis fósseis, como o petróleo e com isso acaba acarretando um aumento de contaminação do ambiente aquático devido sua extração, transporte, armazenamento (IOTPF, 2023).

Segundo relatório da IOTPF (2017), milhões de toneladas de petróleo foram derramadas no mar nos últimos anos, sendo que destes, 6.000 toneladas foram derramadas no ano de 2016. Logo, são inúmeros os casos de derramamento em todo o mundo e, que se tornam um problema de grande importância ambiental.

Em 2022, foram derramados por petroleiros em média de 15.000 toneladas de óleo, número maior que nos últimos três anos anteriores. É possível observar na Figura 3 que vêm ocorrendo uma diminuição de acidentes, mas ainda são derramados uma grande quantidade de petróleo e seus derivados, suficientes para degradarem flora e fauna do ambiente afetado.

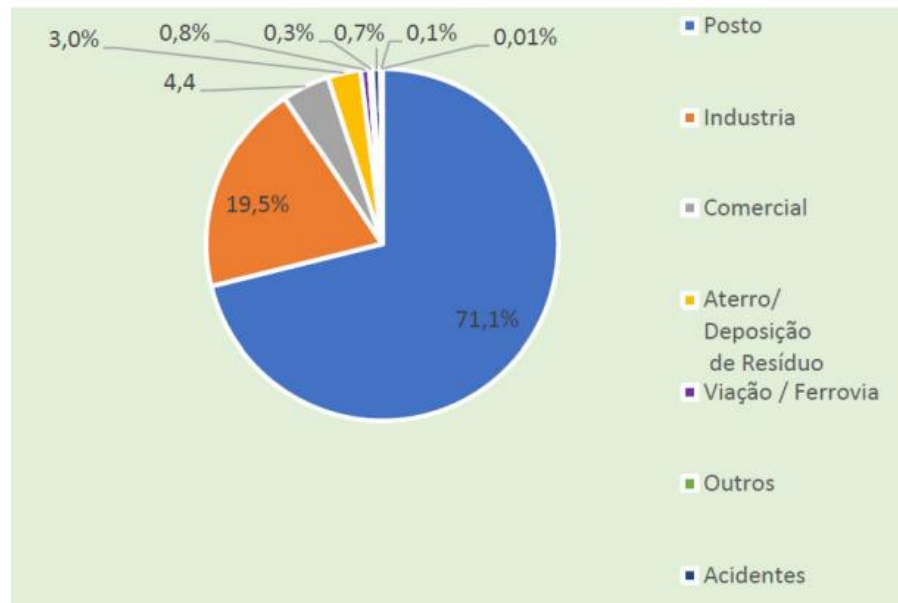
Figura 3 - Demonstrativo dos derramamentos de petróleo desde 1970.



Fonte: ITOPF (2023)

No Brasil, o diagnóstico do Programa Nacional de Áreas Contaminadas realizado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) contabilizou 6.969 registros de áreas contaminadas distribuídas em 10 estados no país. Nestas áreas, as principais atividades que originaram contaminação foram os postos de combustíveis (71,1%) e indústrias (19,5%), conforme pode ser visualizado na Figura 4. Contudo, o diagnóstico apontou que as informações oficiais sobre a quantidade de áreas contaminadas são limitadas, assim como são limitadas as informações acerca das estruturas e procedimentos conduzidos por estados e municípios para promover a prevenção, identificação e gestão de áreas contaminadas (MMA, 2020).

Figura 4 - Demonstrativo dos derramamentos de petróleo desde 1970.



Fonte: MMA (2020)

### 3.2 PRINCIPAIS CONTAMINANTES DO PETRÓLEO

O petróleo é uma mistura complexa que é formada a partir de vários compostos. Porém, de acordo com a origem no qual o petróleo foi formado, existirão mudanças de composição e propriedades, químicas e físicas, respectivamente, que variam de um campo petrolífero para outro. Pode ser fluido e claro ou até mesmo viscoso e escuro com grandes quantidades de compostos pesados. Devido a sua composição diversificada acaba dificultando o tratamento de áreas contaminadas por essas substâncias (ANDRADE; AUGUSTO; JARDIM, 2010).

Thomas (2004) demonstra esta composição do petróleo de forma detalhada, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do petróleo bruto (% em peso).

Elementos	Porcentagem (%)
Hidrogênio	11-14 %
Carbono	83-87 %
Enxofre	0,006-8%
Nitrogênio	0,11-1,7 %
Oxigênio	0,1- 2%
Metais	Até 0, 3%

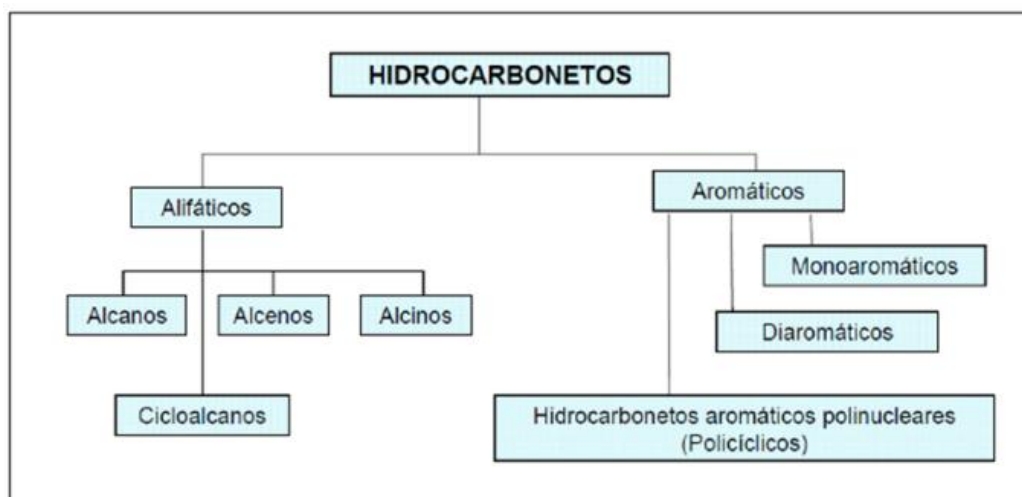
Fonte: Adaptado de Thomas (2004)

Para Thomas (2004) a elevada porcentagem de carbono (83-87%) seguido de hidrogênio (11-14%) na composição do petróleo bruto, mostra que os seus principais constituintes são os hidrocarbonetos. Os demais aparecem na forma de compostos orgânicos contendo outros elementos, porém os mais comumente encontrados são o nitrogênio, o enxofre e o oxigênio.

O petróleo possui em sua estrutura química, dois grandes grupos como mostrado na Figura 5, os alifáticos e os aromáticos (POTTER; SIMMONS, 1998). Os hidrocarbonetos alifáticos são compostos que apresentam cadeias lineares (saturadas ou insaturadas) ou cíclicas ausentes de anéis aromáticos (BRITANNICA, 2019), sendo estes o propano, metano, etano e cicloexano.

Já os hidrocarbonetos aromáticos apresentam cadeia fechada e ligações duplas alternadas por ligações simples entre os carbonos dando origem a anéis aromáticos, podendo apresentar um ou mais anéis que subdividem a classificação em monoaromáticos, diaromáticos e aromáticos policíclicos ou polinucleares (CAREY, 2008). São os principais aromáticos benzeno, etilbenzeno, tolueno, xileno, naftaleno, fenantreno, antraceno e benzo[a]pireno (POTTER; SIMMONS, 1998).

Figura 5 - Diagrama esquemática da classificação dos hidrocarbonetos de acordo com sua estrutura química.



Fonte: adaptado de Potter; Simmons (1998)

Como já mencionado anteriormente, o petróleo possui diversos componentes complexos que acabam dificultando sua retirada/isolamento em sua totalidade do ambiente poluído e, além de os métodos para remediação serem de alto custo e não poderem garantir uma remoção muito eficiente (MORAIS *et al.*, 2006). Ainda que, após o derramamento, o petróleo fica sujeito a diversos processos como evaporação, espalhamento, dissolução, entre outros e, todos esses processos influenciam no tratamento e recuperação do ambiente contaminado (KINGSTON, 2002).

A referida mistura heterogênea e complexa pode conter milhares de substâncias orgânicas diferentes, dessa forma, são dispostas 4 frações de acordo com a solubilidade em solventes orgânicos: hidrocarbonetos saturados, hidrocarbonetos aromáticos, resinas e asfaltenos (HUR *et al.*, 2018; CHEN; QUE, 2018; DAS; CHANDRAN, 2011).

Portanto, a contaminação do solo e água por hidrocarbonetos derivados de petróleo, mesmo que seja em pequenas concentrações podem constituir um grande perigo à saúde humana assim como ao meio ambiente (COSTA, 2011).

De acordo com a legislação brasileira vigente é exigido que as áreas contaminadas devam ser remediadas, para minimizar a interferência ambiental e restaurar os ecossistemas. Contudo, são necessários o diagnóstico, a análise e o monitoramento do impacto e medidas remediadoras (CETESB, 2010).

A Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 273/2000, define que toda instalação e sistemas de armazenamento de derivados de petróleo configuram-se como empreendimento potencialmente ou parcialmente poluidores e geradores de acidentes ambientais, considerando assim que os vazamentos de derivados de petróleo e outros combustíveis podem causar contaminação de corpos



d'água subterrâneos e superficiais, do solo e do ar. Já a Resolução CONAMA nº 420, publicada em 2009, fornece diretrizes e procedimentos para o gerenciamento de áreas contaminadas e estabelece critérios e valores orientadores referentes à presença de substâncias químicas no solo.

### 3.3 TECNICAS DE REMEDIAÇÃO

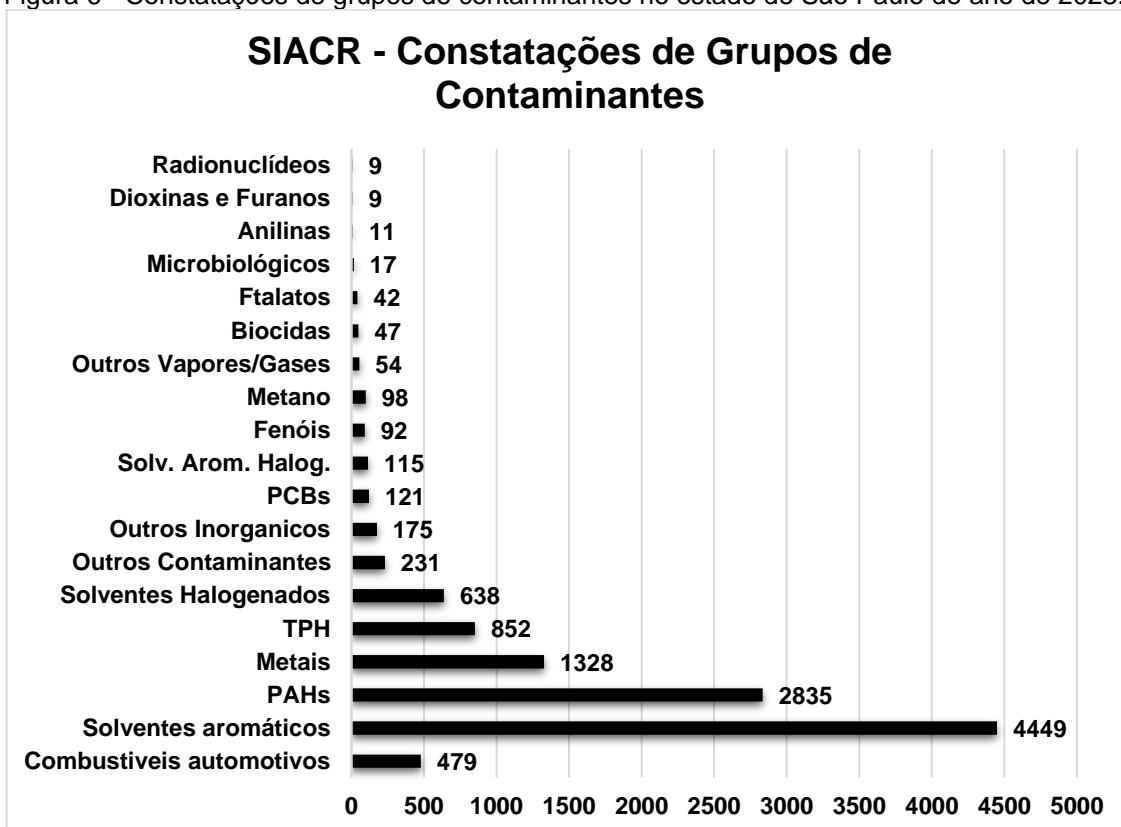
Dentre as variadas técnicas existentes para estudos de remediação em derramamentos de petróleo, os tratamentos físicos, químicos e biológicos são os mais utilizados, dos quais os físicos e químicos causam uma maior dispersão do poluente de forma a tornar baixa a eficiência do processo e, além disso, apresentam custo muito elevado (O'BRIEN *et al.*, 2018; LI *et al.*, 2018). Entretanto, uma alternativa é o uso de microrganismos na degradação dos compostos presentes no petróleo, pois apresenta baixo custo e um alto rendimento (LIU *et al.*, 2018).

As técnicas de remediação utilizadas para os compostos de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (PAHs), Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos (BTEX) e hidrocarbonetos presentes no petróleo vêm sendo muito estudadas pelo fato de sua grande contaminação e maior dificuldade de remediação (ORTA-MARTÍNEZ *et al.*, 2018). Já os hidrocarbonetos alifáticos do petróleo possuem baixa solubilidade e, por isso apresentam maior facilidade de degradação. A remoção destes PAHs, BTEX e hidrocarbonetos da água e efluentes vêm sendo realizada através de processos físico-químicos, como adsorção, ozonização, fotoxidação, entre outros (PINHATI *et al.*, 2014).

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), órgão ambiental com mais dados de áreas contaminadas do Brasil, disponibiliza anualmente o Relatório de Áreas Contaminadas e Reabilitadas do Estado de São Paulo apresentando as informações georreferenciadas sobre as áreas cadastradas através do sistema DataGEO (CETESB, 2023).

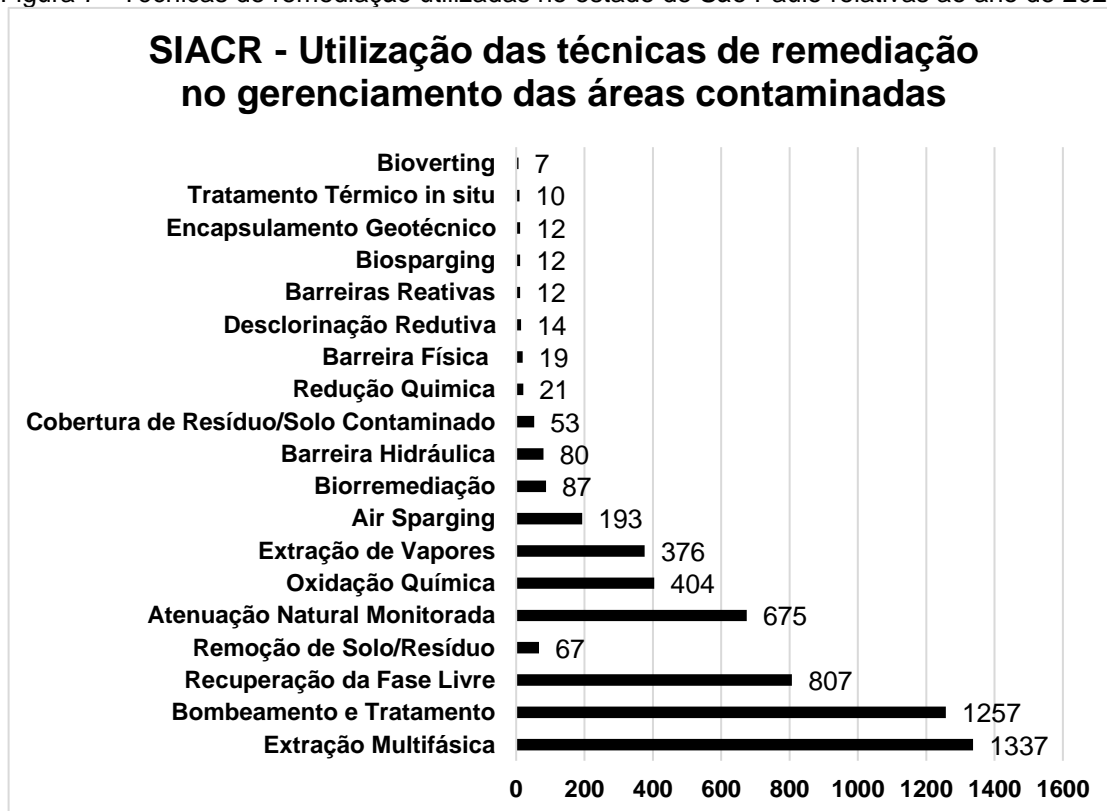
O relatório apontou que os principais grupos de contaminantes encontrados nas áreas cadastradas no estado de São Paulo refletem a influência da atividade de revenda de combustíveis, destacando-se: solventes aromáticos (basicamente representados pelo BTEX), combustíveis automotivos, PAHs e Hidrocarbonetos totais de petróleo (TPH), conforme pode ser observado no Figura 6 (CETESB, 2023). Quanto as técnicas de remediação (Figura 7), que podem ser realizadas de maneira isolada ou em consórcio, a extração multifásica, o bombeamento e tratamento e a recuperação de fase livre são as técnicas de remediação mais empregadas no tratamento das águas subterrâneas (zona saturada), enquanto a remoção de solo/resíduo e a extração de vapores destacam-se como as técnicas mais utilizadas para os solos (zona não saturada). As técnicas de biorremediação, como *bioventing*, *biosparging* e biorremediação são aplicadas em menor escala em comparação as físico-químicos (CETESB, 2023).

Figura 6 - Constatações de grupos de contaminantes no estado de São Paulo do ano de 2023.



Fonte: CETESB (2023)

Figura 7 - Técnicas de remediação utilizadas no estado de São Paulo relativas ao ano de 2023.



Fonte: CETESB (2023)

Quando comparados os processos biológicos, com os processos físicos e/ou químicos, são considerados mais seguros, menos agressivos ao meio ambiente, mais eficientes e possuem menor custo de operação (PERFUMO *et al.*, 2018).

Com intuito de analisar e compreender técnicas de remoção dos componentes do petróleo em ambientes poluídos, vários métodos e formas de tratamento vêm sendo estudados (MURADO *et al.*, 2011). Uma das técnicas mais atuais, com alta eficiência e baixo custo é o uso de microrganismos que degradam alguns componentes químicos do petróleo (SANTOS; MARANHO, 2018).

Existem vários métodos físico-químicos tradicionais disponíveis para remediação de áreas contaminadas por hidrocarbonetos, como lavagem do solo, extração de vapor do solo, tratamento biológico, incineração, uso de barreiras de petróleo e solidificação. Contudo, muitas dessas abordagens são processos disruptivos, trabalhosos e relativamente caros, exigindo muito tempo e recursos. Nos EUA, por exemplo, os custos básicos para a remoção de poluentes de locais comerciais de grande escala custam no mínimo US\$ 200.000,00 com um adicional de US\$ 40 a 70 para cada metro cúbico de solo contaminado. A Tabela 2 resume os benefícios e as limitações dessas abordagens apresentadas por Koshlaf e Ball (2017).

Tabela 2 - Resumo das técnicas de biorremediação para solos contaminados com hidrocarbonetos.

Estratégia	Método	Local de tratamento	Custo (US\$/m <sup>3</sup> )	Benefícios	Limitações
Físico	Extração de vapor	<i>Ex situ</i>	405–1.485	Rápido Remoção permanente de poluentes Ideal para altos níveis de poluição	Dispendioso Destrutivo Propenso a poluição secundária
Químico	Dessorção térmica	<i>Ex situ</i>	80–440	Rápido A dose não gera grandes volumes de resíduos Ideal para alto nível de contaminação	Dispendioso Destrutivo Propenso a poluição secundária
Biológico	Bioestimulação	<i>In situ</i>	30–100	Ambientalmente amigável Custo-benefício Interferência mínima no local Útil para baixo nível de poluentes	Requer mais tempo Baixa previsibilidade Dependente de fatores ambientais

Fonte: Koshlaf e Ball (2017)

Diversas tecnologias de tratamento e remediação do solo, como físicas, químicas, biológicas e combinadas, estão disponíveis. Cada uma possui seus processos, mecanismos, vantagens e limitações. No entanto, devido à complexidade das condições do ambiente, à variedade de poluentes e à diferença no grau de contaminação do solo, nenhuma tecnologia única pode ser adequada para todos os tipos de locais contaminados por óleo. Assim, a tendência futura é o uso de tecnologias de remediação combinadas, que são mais adaptáveis, sustentáveis e economicamente viáveis (LV; BAO; ZHU, 2022).

### 3.4 PROCESSOS BIOLÓGICOS

As técnicas biotecnológicas atuais tem possibilitado uma diversidade de soluções para a humanidade, dentre elas permitido alternativas para tentar minimizar problemas de contaminação ambiental, como por exemplo, o uso de técnicas de biorremediação, ou seja, processos que empregam organismos vivos e suas enzimas na biodegradação de compostos xenobióticos (compostos constituídos por moléculas estranhas ao ambiente natural, ou em concentrações maiores que as encontradas em solos não contaminados), visando a sua erradicação, redução ou transformação em substâncias menos tóxicas (LEONEL *et al.*, 2010).

A biodegradação de petróleo por microrganismos depende de diversos fatores, incluindo fatores físicos, químicos e biológicos (GUERRA *et al.*, 2018). Além disso, temos que a taxa de degradação depende da composição do óleo, da densidade, da concentração dos hidrocarbonetos, da temperatura, concentração de oxigênio, quantidade de nutrientes, concentração de sais no meio, pressão, agitação e outros parâmetros (AWASTHI *et al.*, 2018).

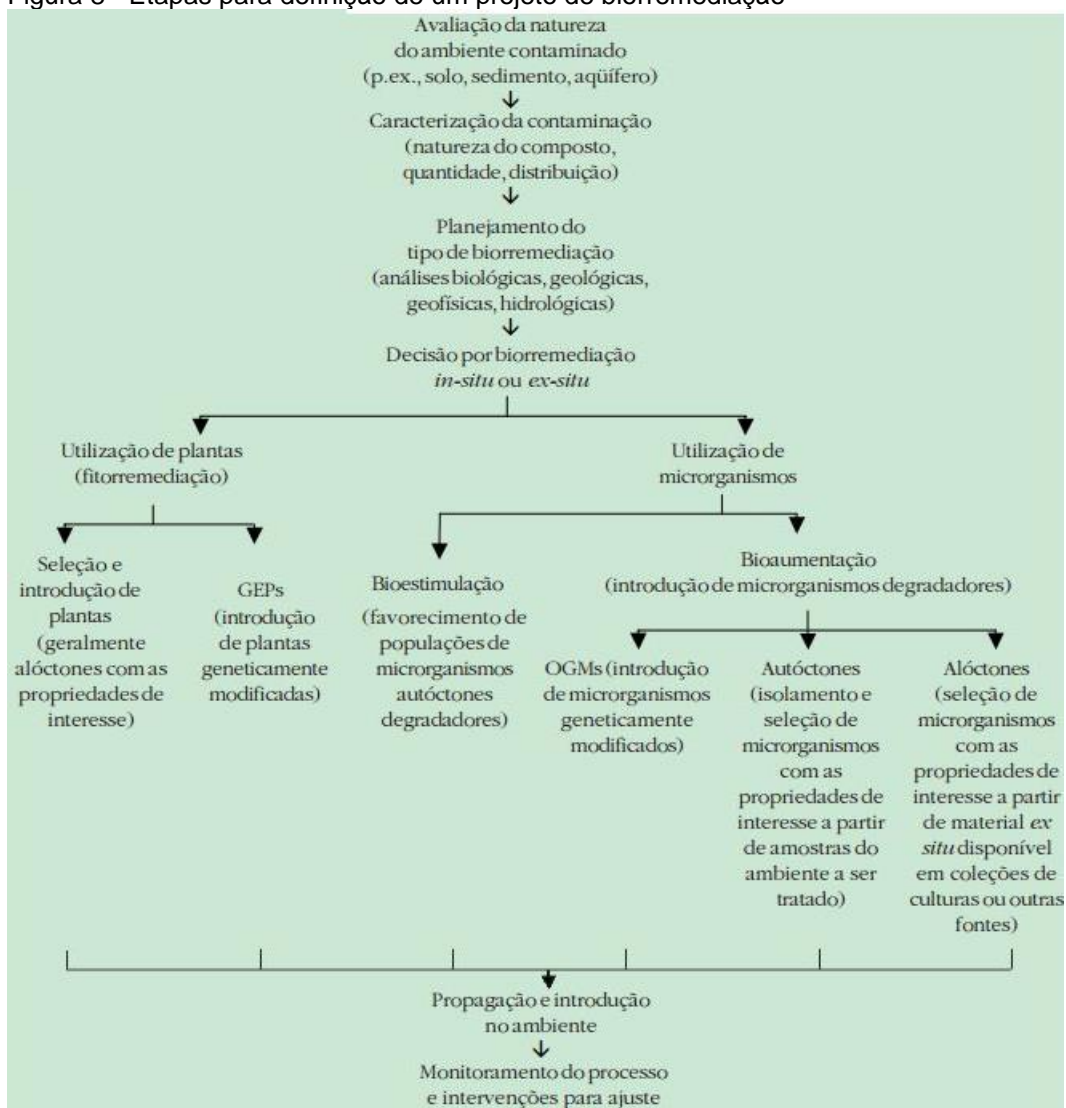
Hidrocarbonetos aromáticos com baixa massa molecular como tolueno, xileno e benzeno são tóxicos e afetam o ambiente de forma drástica imediatamente após o contato com o mesmo, porém, sua degradação ocorre de forma extremamente fácil pelos microrganismos após a produção de moléculas anfipáticas que possibilitam maior contato entre enzimas e substrato (BUSTILLO-LECOMPTE; KAKAR; MEHRVAR, 2018).

Para Santos *et al.* (2021), o processo de biorremediação se apresenta mais efetivo quando comparado aos outros métodos de remediação. Isso se deve ao fato de que, após iniciado o processo, os subprodutos gerados não necessitam de tratamento específico, resultando em um menor impacto ambiental. Ainda, de acordo com o autor, mesmo que esse processo demande maior monitoramento e manutenção do local e condições favoráveis à sua aplicação, apresenta-se como o mais fácil em relação a sua aplicação, sendo considerado de baixo custo e podendo ser implantado tanto em *in situ* quanto *ex situ*.

A caracterização do local permite um diagnóstico detalhado das condições do local contaminado, auxiliando na seleção da técnica de biorremediação mais adequada e viável, seja ela *ex situ* ou *in situ*. Assim, a implementação da biorremediação, deve adotar algumas etapas como: o estudo do ambiente, o tipo de contaminante, os seus riscos e a legislação vigente (CORIOLANO; FILHO, 2016).

A etapa inicial de análise envolve a caracterização do tipo e da quantidade do contaminante, assim como avaliações de ordem biológica, geológica, geofísica e hidrológica definidas como um conjunto de reações químicas catalisadas por enzimas, células ou tecidos de origem vegetal, microbiana ou animal (Figura 8). Deve-se realizar análises biológicas em laboratórios, com o objetivo de otimizar a biodegradação do poluente. Para essas avaliações empregam-se dois tipos de testes, o bioestímulo que consiste na adição de nutrientes e/ou surfactantes, e o bioaumento pela adição de culturas de microrganismos biodegradadores. A partir dos dados obtidos, têm-se a escolha da técnica de biorremediação mais adequada para cada situação. Para verificar a eficiência dos processos *in situ*, novos testes de campo são realizados (GAYLARDE; BELLINASSO; MANFIO, 2005).

Figura 8 - Etapas para definição de um projeto de biorremediação



Fonte Gaylarde; Bellinaso; Manfio (2005)

As técnicas *ex situ* envolvem a remoção dos materiais contaminados do local, permitindo um maior controle sobre o processo de remediação, das quais pode-se citar as biopilhas, leiras, biorreatores e *Land Farming*. Dentre as principais vantagens dessas técnicas destaca-se a não necessidade de uma extensa avaliação preliminar do local contaminado antes da remediação, podendo ser aplicadas em uma ampla gama de poluentes de forma controlada. É possível os ajustes nas condições e parâmetros biológicos, químicos e físico-químicos necessários para uma biorremediação eficaz e eficiente. No entanto, essas técnicas tendem a ser mais caras devido aos custos adicionais associados à escavação, transporte e tratamento dos materiais contaminados em instalações especializadas. Além disso, em determinados locais, como centros urbanos, sob edifícios e locais de trabalho, o uso de técnicas *ex situ* não é comum, pois provocam perturbações na estrutura do solo incômodos a vizinhança (MAITRA, 2018b).

As técnicas de biorremediação *in situ* são diversas, dentre eles existe a atenuação natural, *bioslurping*, *bioventing*, *biosparging* e fitorremediação. Tais técnicas são realizadas no próprio local contaminado, sem a necessidade de remoção dos materiais. Isso elimina os custos de escavação, mas pode apresentar desafios

em termos de instalação de equipamentos no local e dificuldade de visualização e controle efetivo da subsuperfície contaminada. Portanto, algumas técnicas de biorremediação *in situ* podem ser menos eficientes em certas situações (MAITRA, 2018a; KOSHLAF; BALL, 2017).

Todas estas técnicas seguem basicamente uma das estratégias utilizadas na biorremediação: bioestimulação e bioaumentação. A bioestimulação envolve a adição de nutrientes ao ambiente contaminado para estimular o crescimento e atividade dos microrganismos autóctones, ou seja, aqueles naturalmente presentes no local. Os nutrientes adicionados podem incluir compostos como nitrogênio e fósforo, que são essenciais para o crescimento do microrganismo. Além disso, outras substâncias chamadas de surfactantes podem ser utilizadas para aumentar a solubilidade dos hidrocarbonetos, facilitando sua degradação pelos microrganismos (KOSHLAF; BALL, 2017; MAITRA, 2018 a,b).

A bioaumentação, por sua vez, envolve a introdução de microrganismos no ambiente contaminado. Esses microrganismos podem ser bactérias, fungos ou até mesmo Organismos Geneticamente Modificados (OGMs). No caso dos OGMs, eles são geneticamente modificados para apresentar características desejáveis, como uma maior capacidade de degradação dos hidrocarbonetos (NWANKWEGU, 2022).

A seleção dos microrganismos utilizados na bioaumentação pode ser feita a partir de microrganismos autóctones presentes no próprio ambiente contaminado, ou então microrganismos alóctones, que não são nativos da área, mas possuem as propriedades desejadas. Esses microrganismos podem ser isolados a partir de amostras do ambiente a ser tratado ou obtidos de coleções de culturas (MAITRA, 2018).

Orellana *et al.* (2022) realizaram um levantamento de custo de 130 projetos de biorremediação, resultando num custo que variou de US\$ 0,5 e US\$ 1.820 por m<sup>3</sup> de solo tratado. Os projetos que registraram custos < US\$ 2 por m<sup>3</sup> de solo tratado foram associados a tratamentos baseados exclusivamente em bioestimulação, e esses tratamentos removeram apenas 50% dos hidrocarbonetos. Em contraste, projetos que relataram custos superiores a US\$ 700 por m<sup>3</sup> de solo tratado envolveram tratamentos de diversos contaminantes, como BTEX, compostos orgânicos voláteis (VOC), PAHs e metais pesados, usando uma variedade de abordagens, incluindo bioestimulação, bioaumento e tratamentos térmicos. A distribuição dos custos dos projetos parece ser mais influenciada pelo tipo de tratamento de remediação do que pelo tipo de contaminantes no solo. Desses projetos, os com menor custo (36) foram baseados em bioventilação (20), bioestimulação (10), extração de vapor de solvente (5) e fitorremediação (1). Os projetos com custos mais elevados (94) envolveram abordagens como bioventilação (27), térmica (26), extração de vapor de solvente (13), bioestimulação (12), bioaumento (1), outras (6) e combinadas (9) tratamentos. Vários projetos pertencentes aos 40% de custo mais baixo eram baseados em bioventilação e bioestimulação, técnicas voltadas principalmente para metabolizar mais facilmente poluentes biodegradáveis.

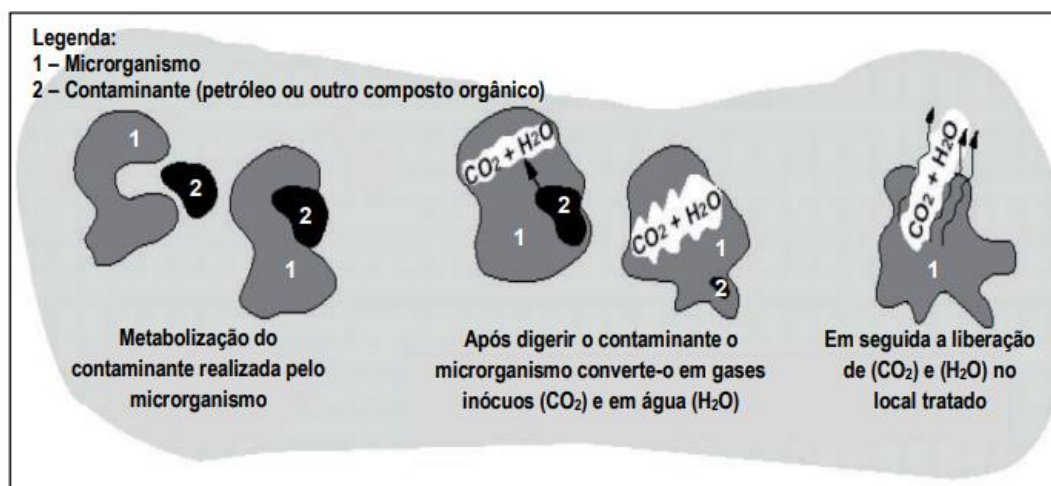
Contudo, o custo da remediação não deve ser o único fator determinante na escolha da técnica de biorremediação. As características geológicas do local contaminado, como o tipo de solo, a profundidade e o tipo de poluente, devem ser consideradas, assim como a proximidade do local em relação a áreas habitadas. Além disso, as características de desempenho de cada técnica de biorremediação devem ser avaliadas para garantir a escolha do método mais adequado e eficiente para tratar eficazmente os locais contaminados (MAITRA, 2018a, b).

### 3.5 MICRORGANISMOS DEGRADADORES

A degradação de substâncias xenobióticas por microrganismos presentes no solo depende da presença de várias enzimas que realizam metabolismo para seu crescimento, e dessa forma conseguem remediar os compostos químicos, reduzir as concentrações presentes no ambiente ou torná-los menos tóxicos. Dentre os microrganismos envolvidos neste processo estão presentes representantes dos eucariotos e procariotos de vários gêneros.

Em seu estudo de dissertação Muteca (2012), observou que a degradação pode ocorrer por intermédio do metabolismo de respiração aeróbia ou anaeróbia. Desta forma, para que haja a biodegradação completa ou a mineralização, o composto original precisa ser oxidado formando dióxido de carbono e água, ocorrendo assim à produção de energia que é utilizada na síntese do material celular (biomassa). Com isso, a degradação é catalisada por uma enzima específica existente no conjunto metabólico da célula degradante. A Figura 9 representa de forma simplificada a ação do microrganismo no processo de biorremediação.

Figura 9 - Etapas da ação do microrganismo no processo de biorremediação por degradação.



Fonte: Adaptado de Andrade, Augusto e Jardim (2010)

Existem diversos microrganismos que possuem características específicas de degradação de compostos presentes no petróleo, e, devido aos inúmeros microrganismos, a técnica de consórcio vem sendo utilizada, pois possibilita que a ação enzimática seja mais eficiente e o número de enzimas produzidas para o metabolismo seja maior (CAO *et al.*, 2012). Logo, uma comunidade com três ou mais microrganismos é inserida no ambiente poluído de forma a aumentar a eficiência do processo de biodegradação do petróleo (DAS; CHANDRAN, 2011).

Estudos a partir de amostras ambientais contaminadas por hidrocarbonetos de petróleo, grupos de pesquisa vem utilizando estratégias de metagenômica para caracterizar o perfil taxonômico e funcional da microbiota associada a presença de hidrocarbonetos (GUERRA *et al.*, 2018; NAPP *et al.*, 2018; FONSECA *et al.*, 2019; ARAÚJO *et al.*, 2020a; FONSECA *et al.*, 2022). Com estas pesquisas foi possível identificar os gêneros bacterianos mais representados. Por meio de técnicas de microbiologia clássica isolados bacterianos vem sendo obtidos, compondo assim um banco de microrganismos com atividade de degradação de hidrocarbonetos, cujos

genomas estão sendo sequenciados. Atualmente, dispendo de 23 genomas sequenciados os quais são alvos de análise (SILVA, 2022).

Um grupo de pesquisa da Universidade Federal do Rio Grande do Norte possui um banco de microrganismos estabelecido ao longo do tempo por seus atuais membros e ex-integrantes (FREITAS, 2019; GUERRA *et al.*, 2018; ARAÚJO *et al.*, 2020b; BARBALHO, 2021; FONSÊCA *et al.*, 2022) através do isolamento de bactérias provenientes de fontes relacionadas ao petróleo, que foram identificados, caracterizados e tiveram seu genoma completo sequenciado.

Os gêneros e espécies de bactérias que compõem o banco citado anteriormente já possuem relatos na literatura por apresentarem atividade na degradação dos hidrocarbonetos (BHATIA *et al.*, 2018; WANG, 2020).

O mesmo grupo ainda descobriu que os isolados oriundos de fontes relacionadas a petróleo apresentam uma diferença observada na composição genética dos isolados pertencentes ao banco do laboratório e que estas diferenças podem ser atribuídas as circunstâncias e pressões evolutivas decorrentes das distintas condições ambientais nas quais os organismos foram submetidos e se desenvolveram (SIEBER *et al.*, 2019; LAMONTAGNE *et al.*, 2004; BERDEJO *et al.*, 2021).

Silva (2022), ao analisar diferentes isolados oriundos de fontes relacionadas ao petróleo observou que ao distribuir o total dos genes presentes nos isolados em suas respectivas vias de degradação, os resultados apresentados tornam mais evidentes as diferenças entre isolados com genoma completo sequenciado quando comparados aos seus respectivos genomas de referência. Constatando-se que os isolados provenientes de fontes relacionadas ao petróleo apresentam maior número de genes associados a degradação de hidrocarbonetos e atuam em quantidade maior de vias de degradação e metabolismo de xenobióticos, sendo 18 vias para os provenientes de fontes relacionadas ao petróleo em contraposição a 16 vias para os analisados através genomas de referência.

Existem os microrganismos degradadores de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e monocíclicos. Na presença de várias enzimas específicas estes microrganismos utilizam esses compostos como fonte de carbono e energia para o seu crescimento, transformando moléculas complexas em produtos comuns ao seu metabolismo (JACQUES *et al.*, 2007).

Para que o processo biológico seja possível, é necessária a presença, no local de contaminação, de nutrientes suficientes para o desenvolvimento e a manutenção da vida dos microrganismos decompositores. Possibilitando assim que a técnica de biorremediação denominada de bioestímulo, empregada com o objetivo de adicionar fontes de nutrientes, sais, aceptores de elétrons, enzimas extracelulares ou emulsificantes que, por sua vez, irão influenciar à atividade microbiana nativa, promovendo alterações no ambiente e tornando os processos fisiológicos e bioquímicos mais eficientes e constantes. Permitindo também adição de nutrientes, e com isso é desencadeada a bioestimulação possibilitando também outras respostas, como: o aumento na aeração do solo, o monitoramento e a correção da sua umidade e pH (MORAES *et al.*, 2014).

### **3.5.1 Consórcio de microrganismos**

Uma das práticas para utilização de microrganismos é a técnica de consórcio, onde vários microrganismos com diferentes características metabólicas são usados



para biodegradação de determinados compostos, como os presentes no petróleo (WOLNA-MARUWKA *et al.*, 2018).

O consórcio de microrganismos propicia uma maior e mais variada produção de enzimas que degradam os compostos do petróleo, assim, o processo de degradação ocorre de forma mais eficaz e rápida (SILVA *et al.*, 2014). Além disso, um determinado microrganismo pode produzir metabólitos que servem como substâncias intermediárias para outro microrganismo do consórcio, auxiliando no metabolismo do mesmo (CIEPLAK *et al.*, 2018). Portanto, o uso de variados microrganismos ao mesmo tempo e no mesmo local pode auxiliar no processo de biorremediação, entretanto, os microrganismos devem possuir enzimas que degradem o composto poluente (SILVA *et al.*, 2014).

### **3.5.2 Biossurfactantes**

Com o passar dos anos, a sociedade ficou mais interessada em questões relacionadas ao meio ambiente e, por isso, a indústria química criou métodos e produtos menos agressivos para o meio ambiente, dessa forma, o interesse por biossurfactantes e suas fontes naturais microbianas estão sendo estudados mais profundamente (BRUMANO *et al.*, 2016).

De forma natural, diferentes microrganismos podem produzir diversos surfactantes com inúmeras funções específicas, como os sais biliares, saponinas, surfactantes de origem microbiana, entre outros (SILVA *et al.*, 2014).

Assim, os biossurfactantes tem ação semelhante à dos surfactantes sintéticos, apresentando uma porção hidrofóbica e outra hidrofílica e, são classificados de acordo com a composição química da molécula em glicolípídeos, fosfolípídios, entre outros (GEETHA; BANAT; JOSHI, 2018).

### **3.5.3 Organismos Geneticamente Modificados**

Organismos geneticamente modificados (OGMs) são aqueles cuja composição genética foi alterada pela aplicação de técnicas de engenharia genética inspiradas na troca genética natural ou artificial entre microrganismos. OGMs demonstraram potencial para aplicações biodegradativas em solo, águas subterrâneas e ambientes de lodo ativado, exibindo capacidades degradativas aprimoradas abrangendo uma ampla gama de poluentes químicos (MBACHU *et al.*, 2020).

Os OGMs oferecem a vantagem de criar linhas de microrganismos que podem resistir a circunstâncias hostis, podendo ser usados para biorremediação em condições naturais específicas. Contudo, a sua aplicação ainda está limitada à escala laboratorial/piloto, em decorrência do receio de possíveis impactos ambientais ao ambiente e microrganismos nativos que podem ser ocasionados após a aplicação (ADEDEJI *et al.*, 2022).

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

As buscas foram realizadas de acordo como descrito anteriormente. Conforme parâmetro escolhido através de três palavras-chave foi realizada a busca no portal *Web of Science*, entre os períodos de 2016 e 2022, obtendo-se um total de 1.976 publicações, dentre elas: artigos (1.903), capítulos de livros (52), conjuntos de dados (52), livros (06), resenhas (02) e dissertação (01).

A Figura 1 apresenta o número de publicações por assunto (palavras-chave), sendo estes assuntos relacionados a área da publicação direcionamento técnico.

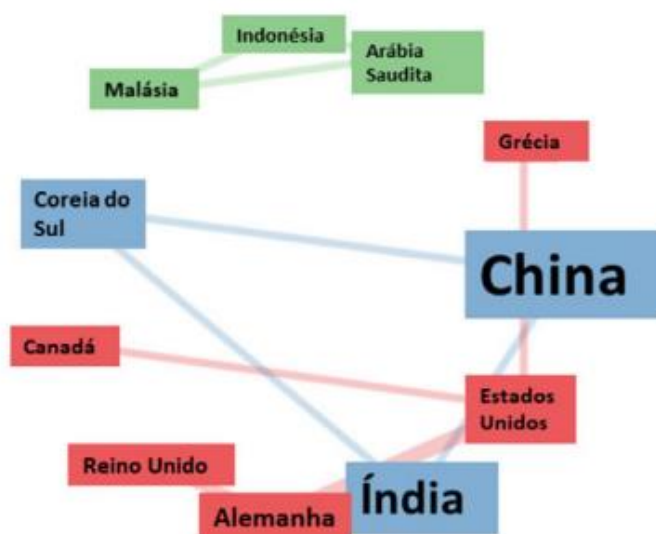
Já a Figura 2 mostra o número de publicações por base de dados/coleção. Sendo as bases *Web of Science* (1072), *DOAJ* (695) e *PubMed* (588) com maior número de publicações.

Estudos como os de Quintella; Mata; Lima (2019), Steliga; Kluk (2020) têm demonstrado que existem técnicas de remediação que possibilitam a eliminação destas contaminantes e, entre eles, a biorremediação é um tratamento natural que utiliza organismos e seus produtos para reduzir ou eliminar totalmente efeitos adversos dos poluentes no ambiente.

Já Costa *et al.* (2023) em um levantamento bibliográfico sobre metabolitos dos hidrocarbonetos entre 2015 e 2021 conseguiram rastrear publicações de 50 países, sendo o ano de 2020 o de maior produção científica, sendo este fato explicado devido a possibilidade de acúmulo de citações, não que o interesse tenha diminuído ao longo dos anos. Neste contexto, os autores também citaram os países mais produtivos cientificamente em relação ao tema principal: China (59), Índia (37), Estados Unidos (20), Alemanha (16), Arábia Saudita (5), Irã (5), México (5), Rússia (5), Canadá (4) e Coreia do Sul (4). Esses resultados mostram quem são os países que lideram pesquisas na área, a China tem demonstrado um grande interesse pelo tema em estudo. É possível que o interesse dos pesquisadores chineses em constante estudo do tema esteja relacionado com a expansão industrial do país, o que pode levar a investimentos em estudos mitigantes de poluição, especialmente de oriundos do petróleo

É possível observar ainda no trabalho de Costa *et al.* (2023) os países que atuam em colaboração (Figura 10). Pesquisas realizadas em colaboração com outros países permitem, além do compartilhamento de tecnologias, assim como a discussão de resultados sob diferentes aspectos, conhecimentos, realidades, experiências, troca de conhecimentos, contribuindo para a aprendizagem, novas parcerias e fortalecendo a divulgação científica. Assim como possibilita no financiamento de pesquisas em parcerias com outras universidades e instituições de pesquisa, assim como na otimização de esforços frente a resposta para a academia científica e tecnológica.

Figura 10 - Países que atuaram em colaboração com outros países (nota: colaboração com no mínimo dois documentos).



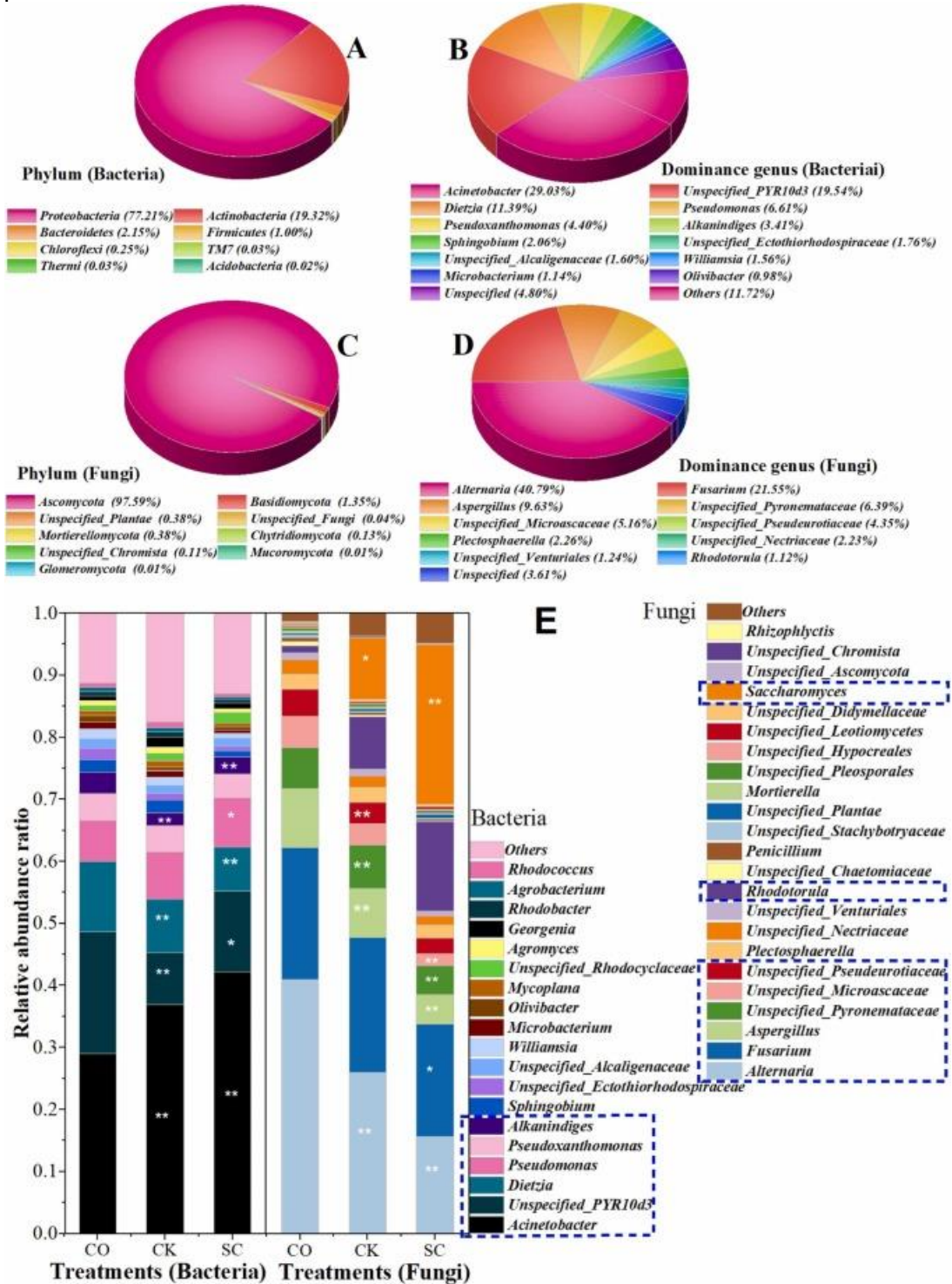
Fonte: Costa *et al.* (2023)

Foi realizada uma busca de publicações em 2023 sobre microrganismos como biorremediadores apresentando resultados positivos em relação a eficiência da remediação biológica. Chongshu *et al.* (2023) testaram biorremediação com fungos e bactérias em solos contaminados com derivados de petróleo. Os filos bacterianos apresentaram-se dominantes nas amostras de solo antes do tratamento para *Proteobacteria*, *Actinobacteria*, *Bacteroidetes* e *Firmicutes* (Figura 11). Foi observada abundâncias relativas de 77,2%, 19,3%, 2,2% e 1,0%, respectivamente. É possível observar ainda na mesma figura, bactérias (A, B), fungos (C, D) filo, gêneros dominantes antes da biorremediação, abundância relativa de bactérias, fungos em cada grupo em nível de gênero e o comportamento após a remediação por duas semanas (E).

Os gêneros bacterianos dominantes incluíam *Acinetobacter*, PYR10d3 não especificado, *Dietzia*, *Pseudomonas*, *Pseudoxanthomonas* e *Alkanindiges*. Já os gêneros fúngicos observados como dominantes foram *Alternaria*, *Fusarium*, *Aspergillus*, *Pyronemataceae* não especificado, *Microascaceae* não especificado e *Pseudeurotiaceae* não especificado, respectivamente (Figura 11 C e D).

Sob a remediação por poluentes baseados em hidrocarbonetos de petróleo, certos táxons apresentaram-se tolerantes ou degradadores de hidrocarbonetos tornam-se dominantes nos locais. Assim como *Proteobactérias* (KE *et al.*, 2021), *Actinobacteria* (HAMDAN; SALAM, 2020), *Firmicutes* (LI *et al.*, 2020), *Bacteroidetes* (LI *et al.*, 2016), *Pseudomonas* (VARJANI; UPASANI, 2016) e *Aspergillus* (AL-HAWASH *et al.*, 2019) como microrganismos dominantes em solos oleosos, apresentaram atividades de degradação significativas. A constatação da presença desses microrganismos funcionais nos locais estudados e a evidente poluição do solo confirmaram a gravidade do vazamento de poluentes, resultando em seu acúmulo. Além disso, as propriedades físicas e químicas do solo não se mostravam adequadas para permitir uma degradação microbiológica rápida (CHONGSHU *et al.* 2023).

Figura 11 - Bactérias (A, B) e fungos (C, D) filo e gêneros dominantes antes da biorremediação, abundância relativa de bactérias e fungos em cada grupo em nível de gênero após a remediação por duas semanas (E). Um asterisco (\*) e dois asteriscos (\*\*) indicam a significância em comparação com o grupo CO em  $p \leq 0,05$  e  $p \leq 0,01$ , respectivamente



Fonte: CHONGSHU *et al.* (2023)

Entre os microrganismos eficazes, apenas as espécies de *Acinetobacter* foram, microrganismos dominantes que confirmaram que *Acinetobacter* era o principal gênero de bactérias para a degradação de hidrocarbonetos (CHONGSHU *et al.*,

2023). Resultado este já demonstrado em trabalhos anteriores, onde *Acinetobacter* degrada com eficiência vários hidrocarbonetos, como n-alcenos e PAHs (ATAKPA *et al.*, 2022; CZARNY *et al.*, 2020) e remediado com eficácia o solo contaminado por petróleo bruto sob condições alcalinas (ZHANG *et al.*, 2021).

De acordo com Radhakrishnan *et al.* (2023), os poluentes de hidrocarbonetos de petróleo são muito estáveis e não são fáceis de degradar, persistem por períodos mais longos, prejudicando assim o ecossistema e as vidas associadas. A biodegradabilidade dos hidrocarbonetos também é desafiadora devido à sua não biodisponibilidade para microrganismos devido à sua hidrofobicidade e insolubilidade em água.

A biorremediação é uma das técnicas úteis, econômicas e sustentáveis para degradar esses contaminantes. Vários resultados de pesquisa validaram essa perspectiva. Os microrganismos que mais se adequam a uma degradação eficiente incluem *Pseudomonas sp.*, *Micrococcus*, *Nocardiosis*, *Acinetobacter radioresistens*, *Bacillus sp.*, *Enterobacter hormaechei* estirpe KA6, *Aspergillus ochraceus*, *Scedosporium apiospermum*, dentre outros (SUNEJA; SRIVASTAV, 2021; YAOHUA *et al.*, 2018) (Tabelas 3 e 4).

Como o tipo de contaminantes pode determinar o período de biodegradação, a biorremediação pode ser realizada *in situ*, *ex situ* ou no método do vaso. Muitos pesquisadores relataram experimentos usando biorreatores em pequena escala. Esses resultados devem ser corroborados com o experimento em larga escala ou em escala industrial. O meio mais amplamente utilizado para isolar microrganismos degradadores de petróleo é o Bushnell-Haas (BH) chegando a escala de 1% de petróleo bruto ou querosene, e o processo de inoculação mais amplamente utilizado é a solução isolada de 0,5 McFarland. É muito importante estar sempre atendo ao delineamento estatístico, é muito significativo, pois a melhor combinação de substratos e microrganismos pode remover TPHs em até 90%, resultados estes obtidos por Parhamfar *et al.* (2020); Poorsoleiman *et al.* (2020); Poorsoleiman *et al.* (2021); Abtahi *et al.* (2020).

Estudos recentes, como os de Quintella *et al.* (2019), Stelika e Kluk (2020) têm demonstrado que existem técnicas de remediação que possibilitam a eliminação destas contaminantes e, entre eles, a biorremediação é um tratamento natural que utiliza organismos e seus produtos para reduzir ou eliminar totalmente efeitos adversos dos poluentes no ambiente. Os agentes de biorremediação os quais não agridem o meio ambiente podem ser microrganismos, enzimas ou plantas (GAUR *et al.*, 2014). A biorremediação é principalmente aplicada a matrizes como o solo, fluidos e vários tipos de águas residuais (ZHANG *et al.*, 2017), e pode ser aplicada *in situ* ou *ex situ* em biorreatores. A sua atratividade está na sua relação custo-eficácia e na sua compatibilidade ambiental, especialmente se aplicada *in situ*, assim como descritos nas Tabelas 2, 3 e 4.

Em geral as contaminações persistentes são em decorrência de vazamentos antigos, que não foram percebidos, em que se tem dificuldade de delimitar a pluma de contaminação. Nesses casos, como a maioria dos postos de abastecimentos estão em áreas urbanas, geralmente a remediação de áreas contaminadas não envolvem a remoção do solo (pela quantidade de solo a ser removida e transportada, por afetar áreas vizinhas), se fazendo necessário o emprego de técnicas de remediação no local, sem a remoção do solo.

Pode-se afirmar, diante dos trabalhos citados, que as técnicas de biorremediação, seja *in situ* ou *ex situ*, constituem uma boa alternativa na descontaminação de ambientes contaminados por petróleo e seus derivados,

apresentando, na maioria das vezes, baixo custo de implementação, e menor risco ambiental do que técnicas de limpeza que envolvem processos físicos e químicos. Para a biorremediação ser bem-sucedida, as técnicas utilizadas necessitam da presença de microrganismos com capacidade fisiológica e metabólica para degradar os poluentes do local, além de alguns fatores físico-químicos do ambiente que favoreçam sua atividade.

Por fim, a definição da técnica de biorremediação mais apropriada, deve ser precedida da caracterização detalhada do local contaminado, levando em consideração diversos fatores relevantes e as limitações e peculiaridades de cada situação específica, maximizando a eficácia da remediação.

Tabela 3 - Microrganismos degradadores de petróleo isolados de vários locais contaminados.

Degradação de Microrganismos	Locais de Isolamento de Xenobióticos	Autores
<i>Micrococcus</i> e <i>Pseudomonas</i>	Amostras de solo contaminadas com óleo de motor usado; de uma oficina em Ado-Ekiti	VASUDEVAN; NAMBI; KUMAR; 2016
<i>Proteus vulgaris</i> SR1	Amostras de peixes recém-mortos perto do ponto de derramamento de óleo no Delta do Níger, Nigéria	VASUDEVAN; KUMAR; NAMBI; 2016
<i>Pseudomonas</i> sp., <i>Achromobacter</i> sp., <i>Bacillus</i> sp. e <i>Flavobacterium</i> sp.	Amostra de solo; obtido de uma região de derramamento de diesel no centro-norte de Alberta, Colúmbia Britânica	KOOLIVAND <i>et al.</i> , 2020
<i>Flavobacterium</i> sp., e <i>Acinetobacterium calcoaceticum</i>	Amostra de solo; coletados de Amanzimtoti, África do Sul	BHANSE <i>et al.</i> , 2022
<i>Bacillus coagulans</i> CR31, <i>Klebsiella pneumonia</i> CR23, <i>Klebsiella aerogenes</i> CR21 e <i>Pseudomonas putrefaciens</i> CR33	Solo de rizosfera contaminado com óleo de motor usado em Sokoto, Nigéria	LIANG <i>et al.</i> , 2020
<i>Pseudomonas</i> sp., <i>Acinetobacter</i> sp., <i>Bacillus</i> sp., <i>Corynebacterium</i> sp. e <i>Flavobacterium</i> sp.	Amostras de solo de oficinas mecânicas de automóveis em Mgbukankpor, Nigéria	SÁEZ <i>et al.</i> , 2021
<i>Pseudomonas putida</i> , (Strain G1) e <i>Pseudomonas aeruginosa</i> (Strain K1)	Amostras de solo de usina de carvão abandonada (PHC) em Ijora-Olapa, Lagos	MAHYUDIN <i>et al.</i> , 2020

Fonte: Radhakrishnan *et al.* (2023)

Tabela 4 - *Resumo* da eficiência da remoção de hidrocarbonetos de acordo com microrganismos potenciais, substrato(s) e detalhes de duração.

Substratos	Microrganismos	Eficiência de Remediação (%)	Autores
Bora oleosa	<i>Acinetobacter radioresistens</i> KA2	90	POORSOLEIMAN <i>et al.</i> , 2020
Lamas de resíduos de petróleo	<i>Acinetobacter radioresistens</i> KA5,	84	HARIPRIYAN <i>et al.</i> , 2022
Águas residuárias de lagar de azeite	<i>Enterobacter hormaechei</i> KA6	84	VASUDEVAN, NAMBI, KUMAR; 2016
Bora de petróleo	<i>Acinetobacter radioresistens</i> KA2	88	POORSOLEIMAN <i>et al.</i> , 2020
Solo contaminado	-	99	VASUDEVAN, NATARAJAN; 2022
Lama oleosa pesada	<i>Staphylococcus equorum</i> KA4, <i>Enterobacter hormaechei</i> KA3	89	SHARMA; PANDEY, 2022
Resíduos de lama de perfuração contaminados com hidrocarbonetos	<i>Brevibacterium casei</i> , <i>Bacillus</i> sp.	99	PARHAMFAR <i>et al.</i> , 2020

Fonte: Radhakrishnan *et al.* (2023)



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante das informações apresentadas, é evidente que a escolha da técnica adequada para a remediação de solos contaminados por hidrocarbonetos derivados de petróleo requer uma caracterização detalhada da área contaminada, incluindo o tipo de contaminante e as soluções técnicas existentes recomendadas para a situação específica. Além disso, é crucial avaliar os riscos associados à exposição da contaminação, o tempo necessário para a remediação, os subprodutos gerados, os custos envolvidos e o grau de interferência na área contaminada e no seu entorno.

Embora a biorremediação seja uma abordagem que se destaca em comparação às outras técnicas químicas e físicas de remediação, devido à sua capacidade de não gerar subprodutos tóxicos, ser de fácil execução, ter baixo custo e ser mais prática, ela não tem sido amplamente empregada para remediar áreas contaminadas por hidrocarbonetos derivados de petróleo, especialmente em abordagens *in situ*. Isso pode estar relacionado à dificuldade de, sem remover o solo, controlar as variáveis que interferem na biorremediação, e do tempo necessário para que a remediação seja efetiva.

Destaca-se a importância, para a definição da técnica de biorremediação mais apropriada em cada situação específica, dos resultados dos estudos realizados sobre a relação entre microrganismos e seu potencial de remediação, especialmente o emprego de consórcio de microrganismos, de OGMs e a o emprego de tecnologias de remediação, que tem demonstrado o aumento da eficiência e diminuição do tempo de remediação.

Portanto, diante da necessidade de abordagens *in situ* para a remediação de áreas contaminadas, seja devido ao alto custo da remoção do solo ou à impossibilidade de removê-lo, é importante incentivar estudos sobre biorremediação *in situ*. Isso permitirá o desenvolvimento de técnicas mais eficazes e sustentáveis para a remediação de solos contaminados por hidrocarbonetos derivados de petróleo.

Existem vários estudos que analisam os microrganismos na biorremediação, relacionando sua eficácia de degradação aos contaminantes. No entanto, a maioria desses estudos se concentra em abordagens *ex situ*, nas quais os fatores de interferência no processo podem ser controlados com maior facilidade.

Dessa forma, para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de estudos de análise: das técnicas biorremediação *in situ*, avaliando a sua eficiência e fatores limitantes; da eficiência da utilização de técnicas combinadas *in situ* para remediação de hidrocarbonetos; e da comparação de eficiência e vantagens, entre técnicas físico-químicas e de biorremediação, de abordagens *in situ*.

## REFERÊNCIAS

- ABTAHI, H. *et al.* Effect of competition between petroleum-degrading bacteria and indigenous compost microorganisms on the efficiency of petroleum sludge bioremediation: Field application of mineral-based culture in the composting process. **J. Environ. Gerenciar**. Vol. 258, p. 110013. 2020.
- ADEDEJI, J. A. *et al.* Microbial bioremediation and biodegradation of petroleum products—A mini review. **Applied Sciences**, v. 12, n. 23, p. 12212, 2022.
- AL-HAWASH, A. B. *et al.* Removal and biodegradation of different petroleum hydrocarbons using the filamentous fungus *Aspergillus* sp. RFC-1. **Microbiologyopen**, v. 8, e00619. 2019.
- ANDRADE, J. A.; AUGUSTO, F.; JARDIM, I. C. S. F. Biorremediação de solos contaminados por petróleo e seus derivados. **Eclética Química**, Campinas, p.17-43, 2010. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/eq/a/sGLvvg5B6qBspNBtncd9GKq/?lang=pt>>. Acesso em: 29 de maio de 2023.
- ARAÚJO, Sinara Carla da Silva. *et al.* MBSP1: a biosurfactant protein derived from a metagenomic library with activity in oil degradation. *Scientific Reports*, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 1–13. 2020a.
- ARAÚJO, W. J. *et al.* Microbial Culture in Minimal Medium With Oil Favors Enrichment of Biosurfactant Producing Genes. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, [S. l.], v. 8, n. August, p. 1–16, 2020b.
- ATAKPA, E.O. *et al.* Improved degradation of petroleum hydrocarbons by coculture of fungi and biosurfactant-producing bacteria. **Chemosphere**. 290. 2022.
- AWASTHI, M. K.; Selvam, A.; Chan, M. T.; Wong, J. W. Bio-degradation of oily food waste employing thermophilic bacterial strains. **Bioresource Technology**, v. 248, p. 141-147, 2018.
- BARBALHO, K. K. S. **Caracterização de comunidades e isolados bacterianos obtidos a partir de amostra de petróleo do pré-sal brasileiro sob cultivo em presença de CO<sup>2</sup>. 2021.** Universidade Federal do Rio Grande do Norte, [S. l.]. 2021.
- BERDEJO, D. *et al.* Emerging mutant populations of *Listeria monocytogenes* EGD-e under selective pressure of *Thymbra capitata* essential oil question its use in food preservation. **Food Research International**, [S. l.], v. 145, n. May. 2021.
- BHATIA, S. K. *et al.* Biotechnological potential of microbial consortia and future perspectives. **Critical Reviews in Biotechnology**, [S. l.], v. 38, n. 8, p. 1209–1229, 2018.
- BRITANNICA. The Editors of Encyclopaedia. "aliphatic compound". **Encyclopedia Britannica**, 10 Jan. 2019. Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/aliphatic-compound>>. Acesso em: 09 Junho de 2023.
- BRUMANO, L. P.; SOLER, M. F.; da SILVA, S. S. Recent advances in sustainable production and application of biosurfactants in Brazil and Latin America. **Industrial Biotechnology**, v. 12, n. 1, p. 31-39. 2016.
- BUSTILLO-LECOMPTE, C. F.; KAKAR, D.; MEHRVAR, M. Photochemical treatment of benzene, toluene, ethylbenzene, and xylenes (BTEX) in aqueous solutions using advanced oxidation processes: Towards a cleaner production in the petroleum

refining and petrochemical industries. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 609-617. 2018.

CAO, Y. *et al.* Isolation and identification of lipopeptides produced by *B. Substillis* SQR 9 for suppressing Fusarium wilt of cucumber. **Scientia Horticulturae**, v. 135, p. 32-9. 2012.

CAREY, F. A. **Aromatic compound**. 2008. Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/aromatic-compound>>. Acesso em: 28 de maio de 2023.

CETESB. COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL **Relatório de áreas contaminadas**. Disponível em: <<https://mapas.infraestruturaambiente.sp.gov.br/portal/apps/MapJournal/index.html?appid=28e7bb2238a443819447a8ec3ae4abe5>>. Acesso em: 13 de março de 2023.

CETESB. COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Gerenciamento de áreas contaminadas: investigação para remediação no Estado de São Paulo**. Dezembro de 2010. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/relacoes-de-areascontaminadas/15>>. Acesso em: 29 de maio de 2023.

CHEN, C. C.; QUE, H. U.S. Patent No. 9,934,367. Washington, DC: U.S. **Patent and Trademark Office**. 2018.

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.

CHONGSHU, L. *et al.* Biodegradation of petroleum hydrocarbons based pollutants in contaminated soil by exogenous effective microorganisms and indigenous microbiome, **Ecotoxicology and Environmental Safety**, Volume 253, 2023.

CIEPLAK, T. *et al.* A bacteriophage cocktail targeting *Escherichia coli* reduces *E. coli* in simulated gut conditions, while preserving a non-targeted representative commensal normal microbiota. **Gut Microbes**, p. 01-19. 2018.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). **Resolução CONAMA nº 273**, de 29 de novembro de 2000. Dispõe sobre a instalação de sistemas de armazenamento de derivados de petróleo e outros combustíveis. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 08 de janeiro de 2001, Seção 1, páginas 20-23.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). **Resolução CONAMA nº 420** de 30 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de 31 qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=620>>. Acesso em: 21 de dezembro de 2020.

CORIOLOANO, A. C. F.; FILHO, M. C. M. Biorremediação, uma alternativa na utilização em áreas degradadas pela indústria petrolífera. **HOLOS**, v. 7, p. 133-150. 2016.

COSTA, B. P. da. *et al.* Uso da análise bibliométrica como ferramenta para o levantamento de estudos sobre a metabolômica aplicada na biorremediação de áreas impactadas por hidrocarbonetos. **Química Nova**. v. 46. n. 2. p. 179-84. 2023.

COSTA, M. D. Notas de aula: Biorremediação de solos contaminados. **MBI 650 Microbiologia do solo**. Universidade Federal de Viçosa. 2011.

CZARNY, J. *et al.*, *Acinetobacter sp.* as the key player in diesel oil degrading community exposed to PAHs and heavy metals. **J. Hazard. Mater.** 383. 2020.

DAS, N.; CHANDRAN, P. Review Article: Microbial Degradation of Petroleum Hydrocarbon Contaminants: An Overview. **Biotechnology Research International**, v.13. 2011.

EUZEBIO, C. S.; RANGEL, G. da S.; MARQUES, R. C. Derramamento de petróleo e seus impactos no ambiente e na saúde humana. **Revista Brasileira de Ciências Ambiental** [Internet]. 2019 nov, v. 52 n. (52): p. 79-98. Disponível em: <[http://www.rbciamb.com.br/index.php/Publicacoes\\_RBCIAMB/article/view/588](http://www.rbciamb.com.br/index.php/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/588)>. Acesso em 15 de junho de 2023.

FONSÊCA, M. M. B. da. *et al.* First insights into bacterial communities in pre-salt oil reveal a far-from-sterile environment. **Fuel**, [S. l.], v. 312, n. September 2021, p. 1–9. 2022.

FONSECA, M. M. B. da. *et al.* Unlocking and functional profiling of the bacterial communities in diesel tanks upon additive treatment. **Fuel**, [S. l.], v. 236, n. September 2018, p. 1311–1320, 2019. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.09.107. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.107>>. Acesso em: 07 de abril de 2023.

FREITAS, J. F. Caracterização da microbiota de uma amostra de petróleo do pré-sal. **The Yale Journal of Biology and Medicine**, [S. l.], p. 115. 2019.

GAUR, N. *et al.* A review with recent advancements on bioremediation-based abolition of heavy metals. *Environ. Sci. Process. Impacts*. 16 (2), 180–193. 2014.

GAYLARDE, C. C.; BELLINASSO, M. D. L.; MANFIO, G. P. Biorremediação: Aspectos biológicos e técnicos da biorremediação de xenobióticos. **Biociência & Desenvolvimento**, n. 34 – janeiro/ junho. 2005.

GEETHA, S. J.; BANAT, I. M.; JOSHI, S. J. Biosurfactants: Production and potential applications in microbial enhanced oil recovery (MEOR). **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**. 2018.

GUERRA, A. B. *et al.* Metagenome enrichment approach used for selection of oil-degrading bacteria consortia for drill cutting residue bioremediation. **Environmental Pollution**, [S. l.], v. 235, p. 869–880. 2018.

HAMDAN, H. Z.; SALAM, D. A. Microbial community evolution during the aerobic biodegradation of petroleum hydrocarbons in marine sediment microcosms: effect of biostimulation and seasonal variations. **Environ. Pollut.** 265, 114858. 2020.

HUR, M. *et al.* Statistically Significant Differences in Composition of Petroleum Crude Oils Revealed by Volcano Plots Generated from Ultrahigh Resolution Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance Mass Spectra. **Energy & Fuels**. 2018.

IOTPF. OIL TANKER SPILL STATISTICS. London, 2017. **Oil tanker spill statistics 2017**. London, 2017. Disponível em: <<https://www.itopf.org/>>. Acesso em: 23 de maio de 2023.

IOTPF. OIL TANKER SPILL STATISTICS. London, 2023. Disponível em: <<https://www.itopf.org/news-events/news/tanker-spill-statistics-2022/#:~:text=Data%20from%2>

OITOPF%20shows%20that,numbers%20reported%20in%20earlier%20decades>. Acesso em: 22 de maio de 2023.

JACQUES, R. J. S. *et al.* Characterization of a polycyclic aromatic hydrocarbon degrading microbial consortium from a petrochemical sludge landfarming site. **Bioremediation Journal, Philadelphia**, v. 11, n. 1, p.1-11. 2007.

KE, C. Y. *et al.* Biotreatment of oil sludge containing hydrocarbons by *Proteus mirabilis* SB. **Environ. Technol. Innov.** 23, 101654. 2021.

KINGSTON, P. F. Long-term Environmental Impact of Oil Spills. **Spill Science & Technology Bulletin**, v. 7, n. 1-2, p. 53-61. 2002.

KOSHLAF, E.; BALL, A. S. Soil bioremediation approaches for petroleum hydrocarbon polluted environments. **AIMS microbiology**, v. 3, n. 1, p. 25. 2017.

LAMONTAGNE, M. G. *et al.* Bacterial diversity in marine hydrocarbon seep sediments. **Environmental Microbiology**, [S. l.], v. 6, n. 8, p. 799–808. 2004.

LEONEL, L. V. *et al.* Biorremediação do Solo. **Terra e Cultura**, n. 51, Ano 26. Julho a Dezembro. 2010.

LI, D. C. *et al.* Remediation of Petroleum-Contaminated Soil and Simultaneous Recovery of Oil by Fast Pyrolysis. **Environmental Science e Technology**. 2018.

LI, F.M. *et al.* Isolation and characterization of heavy polycyclic aromatic hydrocarbon-degrading bacteria adapted to electrokinetic conditions. **Biodegradation**, v. 27, p. 1–13. 2016.

LI, Q. *et al.* Effects of co-contamination of heavy metals and total petroleum hydrocarbons on soil bacterial community and function network reconstitution. **Ecotoxicol. Environ. Saf.** 204, 111083. 2020.

LIU, G. *et al.* Advances in applications of rhamnolipids biosurfactant in environmental remediation: A review. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 115, n. 4, 796-814. 2018.

LOVLEY, D. R. Cleaning up with Genomics: applying molecular biology to bioremediation. **Nature Reviews – Microbiology**. Vol. 1. October. 2003.

LV, Y.; BAO, J.; ZHU, L. A comprehensive review of recent and perspective technologies and challenges for the remediation of oil-contaminated sites. **Energy Reports**, v. 8, p. 7976-7988. 2022.

MAITRA, S. *Ex situ* bioremediation - An overview. Res. J. Life Sci. Bioinfo. Pharmaceu. **Chem. Sci**, v. 4, p. 422-437. 2018b.

MAITRA, S. *In situ* bioremediation - An overview. Res. J. Life Sci. Bioinfo. Pharmaceu. **Chem. Sci**, v. 4, p. 576-598. 2018a.

MARTINS, S. S. S. *et al.* Produção de Petróleo e Impactos Ambientais: Algumas Considerações. **Holos**, vol. 6, 2015, pp. 54-76 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte Natal, Brasil. 2015.

MBACHU, A. E. *et al.* Role of microorganisms in the degradation of organic pollutants: a review. **Energy Environ Eng**, v. 7, n. 1, p. 1-11. 2020.

MMA. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Programa nacional de recuperação de áreas contaminadas [livro eletrônico]** Brasília, DF. 2020.

- MOKIF, L. A.; JASIM, H. K.; ABDULHUSAIN, N. A. Petroleum and oily wastewater treatment methods: a mini review. **Materials Today: Proceedings**, v. 49, p. 2671-2674. 2022.
- MORAES, S. L.; TEIXEIRA, C. E.; MAXIMIANO, A. M. de S. **Guia de elaboração de planos de intervenção para o gerenciamento de áreas contaminadas**. 1ª edição revisada. São Paulo. 2014.
- MORAIS, O. *et al.* **A Teoria das Restrições no Processo de Refino de Petróleo**. 6º Congresso, Universidade de São Paulo. 2006.
- MURADO, M. A *et al.* Dose–response modelling with two agents: application to the bioassay of oil and shoreline cleaning agents. **Journal of hazardous materials**, 185(2-3), 807-817. 2011.
- MUTECA, F. L. L. Biorremediação de solo contaminado com óleo cru proveniente de Angola. **Dissertação** (Mestre em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Programa em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <<http://tpqb.eq.ufrj.br/download/biorremediacao-de-solocontaminado-com-oleo-cru.pdf>>. Acesso em: 25 maio de 2023.
- NAPP, A. P. *et al.* Comparative metagenomics reveals different hydrocarbon degradative abilities from enriched oil-drilling waste. **Chemosphere**, [S. l.], v. 209, p. 7–16. 2018.
- NWANKWEGU, A. S. *et al.* Bioaugmentation as a green technology for hydrocarbon pollution remediation. Problems and prospects. **Journal of Environmental Management**, v. 304, p. 114313. 2022.
- O'BRIEN, P. L. *et al.* Thermal remediation alters soil properties—a review. **Journal of Environmental Management**, v. 206, p. 826-835. 2018.
- ORELLANA, R. *et al.* Economic Evaluation of Bioremediation of Hydrocarbon-Contaminated Urban Soils in Chile. **Sustainability**, v. 14, n. 19, p. 11854. 2022.
- ORTA-MARTÍNEZ, M. *et al.* First evidences of Amazonian wildlife feeding on petroleum-contaminated soils: A new exposure route to petrogenic compounds?. **Environmental Research**, v. 160, p. 514-517. 2018.
- PARHAMFAR, M. *et al.* Biodegradation of heavy oily sludge by a two-step inoculation composting process using synergistic effect of indigenous isolated bacteria. **Process Biochemistry**, n. 91, p. 223–230. 2020.
- PERFUMO, A. *et al.* Biodiversity of biosurfactants and roles in enhancing the (bio) availability of hydrophobic substrates. **Cellular Ecophysiology of Microbe: Hydrocarbon and Lipid Interactions**, p. 75-103. 2018.
- PETERS, G.P. *et al.* Carbon dioxide emissions continue to grow amidst slowly emerging climate policies. **Nat. Clim. Chang.** 10, 3–6 (2020). Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41558-019-0659-6>>. Acesso em 14 de maio de 2023.
- PINHATI, F. R. *et al.* Evaluation of the efficiency of deterioration of aromatic hydrocarbons by bacteria from wastewater treatment plant of oil refinery. **Química Nova**, v. 37, n. 8, p. 1269-1274. 2014.
- POORSOLEIMAN, M. S. *et al.* Bioremediation of Petroleum Hydrocarbons by using a two-step inoculation composting process scaled-up from a mineral-based medium:

Effect of biostimulation of an indigenous bacterial strain. **Waste and Biomass Valorization**, v. 12, p. 2089–2096. 2021.

POORSOLEIMAN, M. S. *et al.* Effect of two-step bioaugmentation of an indigenous bacterial strain isolated from oily waste sludge on petroleum hydrocarbons biodegradation: Scaling-up from a liquid mineral medium to a two-stage composting process. **Environmental Technology & Innovation**, v. 17. 2020.

POTTER, T. L.; SIMMONS, K. E. TPH Series Volume 2: Composition of Petroleum Mixtures. [s.l.]: **Amherst Scientific Publishers**. 1998.

QUINTELLA, C. M.; MATA, A. M. T.; LIMA, L. C. P. Overview of bioremediation with technology assessment and emphasis on fungal bioremediation of oil contaminated soils. **Journal of Environmental Management**, 241, 156–166. 2019.

RADHAKRISHNAN, A. *et al.* Bioremediation of Hydrocarbon Pollutants: Recent Promising Sustainable Approaches, Scope, and Challenges. **Sustainability**, v. 15 , n. 5847. 2023.

SANTOS, A. *et al.* Estudo do processo de biorremediação em solos impactados por derramamento de petróleo. **Diversitas Journal**, v.6, n. 1, p. 823-835. 2021.

SANTOS, J. J. dos.; MARANHO, L. T. Rhizospheric microorganisms as a solution for the recovery of soils contaminated by petroleum: A review. **Journal of environmental management**, 210, 104-113. 2018.

SATTAR, S. *et al.* Composition, impacts, and removal of liquid petroleum waste through bioremediation as an alternative clean-up technology: A review. **Heliyon**, p. e11101. 2022.

SIEBER, C. M. K. *et al.* Unusual metabolism and hypervariation in the genome of a gracilibacterium (Bd1- 5) from an oil-degrading community. **mBio**, [S. l.], v. 10, n. 6, p. 1–14, 2019.

SILVA, D. C. P. *et al.* Derramamento de óleo no mar e implicações tóxicas da exposição aos compostos químicos do petróleo: oil spill in the sea and toxic implications of exposure to petroleum chemical. **Revista Contexto & Saúde**, 21(44), 332–344. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.21527/2176-7114.2021.44.11470>>. Acesso em: 13 de maio de 2023.

SILVA, D. F. de L. Análise genômica de microrganismos degradadores de hidrocarbonetos do petróleo e seu potencial de atuação em hidrocarbonetos prioritários. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Bioinformática. 106 páginas. 2022.

SILVA, R. C. F. S. *et al.* Applications of biosurfactants in the petroleum industry and the remediation of oil spills. **Internacional. Journal of Molecular Science**, n.15, p. 12542-12523, 2014.

SOUSA, K. *et al.* Estudo prospectivo sobre o uso da técnica de biorremediação para a recuperação de solos contaminados por derivados do Petróleo. **Cadernos de Prospecção**, v. 13, n. 3, p. 795-804. 2020.

STELIGA, T.; KLUK, D. Application of *Festuca arundinacea* in phytoremediation of soils contaminated with Pb, Ni, Cd and petroleum hydrocarbons. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 194, 110409. 2020.

- SUNEJA, G.; SRIVASTAV, R. Impact of Microbial Genome Sequencing Advancements in Understanding Extremophiles. **CRC Press: Boca Raton, FL, EUA**, pp. 330–342. 2021.
- THOMAS, J. E. (Org.) **Fundamentos de engenharia de petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência. 2004.
- VARJANI, S. J.; UPASANI, V. N. Biodegradation of petroleum hydrocarbons by oleophilic strain of *Pseudomonas aeruginosa* NCIM 5514. **Bioresour. Technol.** 222, 195–201. 2016.
- WANG, S. Advance in research on petroleum biodegradability in soil. [S. l.], v. 115, n. 1, p. 1–7. **Processes**. 2020.
- WOLNA-MARUWKA, A. *et al.* The Influence of Sewage Sludge and a Consortium of Aerobic Microorganisms Added to the Soil under a Willow Plantation on the Biological Indicators of Transformation of Organic Nitrogen Compounds. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 27, n. 1. 2018.
- YAOHUA, G. *et al.* Co-immobilization of laccase and ABTS onto novel dual-functionalized cellulose beads for highly improved biodegradation of indole. **J. Hazard. Mater.**, v. 365, p. 118–124. 2018.
- ZHANG, S.; GEDALANGA, P. B.; MAHENDRA, S. Advances in bioremediation of 1,4-dioxane contaminated waters. **J. Environ. Manag.** 204, 765–774. 2017.
- ZHANG, X. Y. *et al.*, Combined microbial degradation of crude oil under alkaline conditions by *Acinetobacter baumannii* and *Talaromyces sp.* **Chemosphere**, 273. 2021.