

RESSALVA

Atendendo solicitação da autora, o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 23/10/2027.

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS (BIOLOGIA
CELULAR, MOLECULAR E MICROBIOLOGIA)**

**ESTRATÉGIAS DE BIORREMEDIAÇÃO DE PETRÓLEO EM
MICROCOSMOS DE SEDIMENTO MARINHO: FUNÇÃO E ESTRUTURA
DAS COMUNIDADES MICROBIANAS**

YASMIN MAYRA BISPO

**Rio Claro – SP
2025**



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS (BIOLOGIA
CELULAR, MOLECULAR E MICROBIOLOGIA)**

**ESTRATÉGIAS DE BIORREMEDIAÇÃO DE PETRÓLEO EM
MICROCOSMOS DE SEDIMENTO MARINHO: FUNÇÃO E ESTRUTURA
DAS COMUNIDADES MICROBIANAS**

YASMIN MAYRA BISPO

Dissertação apresentada ao Instituto de Biotecnologia do Câmpus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestra em Ciências Biológicas (Biologia Celular, Molecular e Microbiologia).

Orientador(a): Dra. Lara Durães Sette

Coorientador(a): Dra. Patrícia Giovanella

**Rio Claro – SP
2025**

B622e Bispo, Yasmin Mayra
Estratégias de biorremediação de petróleo em microcosmos de
sedimento marinho : função e estrutura das comunidades microbianas
/ Yasmin Mayra Bispo. -- Rio Claro, 2025
129 p. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Instituto de Biociências, Rio Claro
Orientadora: Lara Durães Sette
Coorientadora: Patrícia Giovanella

1. Microbiologia ambiental. 2. Biotecnologia. 3. Biodegradação. 4.
Petróleo. 5. Sedimento marinho. I. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: BIORREMEDIAÇÃO DE PETRÓLEO EM MICROCOSMOS DE SEDIMENTO MARINHO: FUNÇÃO E ESTRUTURA DAS COMUNIDADES MICROBIANAS

AUTORA: YASMIN MAYRA BISPO

ORIENTADORA: LARA DURÃES SETTE

COORDINADORA: PATRICIA GIOVANELLA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Ciências Biológicas (Biologia Celular, Molecular e Microbiologia), área: Estrutura, Função e Produção de Biomoléculas pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **LARA DURÃES SETTE**
Data: 23/10/2025 13:32:49-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Dra. LARA DURÃES SETTE (Participação Virtual)
Departamento de Biologia Geral e Aplicada / UNESP - Instituto de Biociências de Rio Claro - SP

Documento assinado digitalmente
 **DANIA ELISA CHRISTOFOLETTI MAZZEO MORAI**
Data: 23/10/2025 17:09:54-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Dra. DÂNIA ELISA CHRISTOFOLETTI MAZZEO MORALES (Participação Virtual)
Departamento de Biotecnologia e Produção Vegetal e Animal / Centro de Ciências Agrárias - UFSCar - Araras

Documento assinado digitalmente
 **LUCÉLIA CABRAL**
Data: 23/10/2025 14:40:55-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Dra. LUCÉLIA CABRAL (Participação Virtual)
Instituto de Ciências Biológicas / Universidade de Brasília - DF

Título alterado para: ESTRATÉGIAS DE BIORREMEDIAÇÃO DE PETRÓLEO EM MICROCOSMOS DE SEDIMENTO MARINHO: FUNÇÃO E ESTRUTURA DAS COMUNIDADES MICROBIANAS

Rio Claro, 23 de outubro de 2025

AGRADECIMENTOS

Gostaria de deixar os meus mais sinceros agradecimentos a todos que, de alguma forma, estiveram presentes ao longo desta jornada. Como minha querida orientadora sempre diz, não é possível fazer ciência individualmente, somos sempre acompanhados por uma rede de apoio e colaboradores que nos ajudam a construir e alcançar nossos objetivos. A cada um de vocês, deixo aqui minhas palavras sinceras de gratidão.

Aos meus pais, Andreia e Ronaldo, meu agradecimento mais especial, pelo incentivo constante, pelas conversas, pelo afeto, por sempre acreditarem que eu seria capaz.

À minha orientadora Lara, sou imensamente grata por ter me dito “sim” quando pedi sua orientação, e por todo o suporte, liderança e confiança que foram essenciais para a minha formação profissional e pessoal. À minha coorientadora Patrícia, que ali no dia a dia na bancada, compartilhou todo seu conhecimento e experiência. Agradeço ainda pela paciência e pela insistência também de realmente me fazer entender cada detalhe do que estava fazendo.

Agradeço também aos meus companheiros de mestrado, Miguel e Luciana, por terem feito parte desse lindo trabalho, ajudando sempre nos experimentos, análises e nas resoluções de problemas. A colaboração de vocês foi essencial.

À Elisa e à Milene, pelas contribuições nas análises de bioinformática e na elaboração dos gráficos. Sou extremamente grata pelo suporte. Agradeço ainda ao meu amigo Leonardo, pela disponibilidade e auxílio nas análises estatísticas.

Aos meus amigos do LAMAI e CRM-UNESP, em especial Bolani, Du e Esbrisse. Com certeza meus dias foram muito mais felizes na presença de vocês. Agradeço por todas as risadas, parceria e momentos de lazer. Todos vocês, de alguma forma, fizeram parte deste trabalho.

Agradeço à Universidade Estadual Paulista (UNESP) e a todo o corpo docente que contribuíram significativamente para minha formação acadêmica, bem como todos os funcionários que compõem a rede UNESP.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através do financiamento do projeto MicroBioMaR (CNPq 440774/2020-9).

Enfim, obrigada a todos!

RESUMO

A poluição dos ecossistemas marinhos por hidrocarbonetos representa sérios riscos ambientais e sociais devido à sua natureza tóxica. Casos como o vazamento de óleo na costa brasileira, que afetou mais de 4 mil km, evidenciam a necessidade de metodologias eficazes para restaurar o ambiente marinho. A biorremediação, baseada no uso do metabolismo microbiano, é reconhecida por sua sustentabilidade. Microrganismos degradadores, já presentes nas comunidades microbianas marinhas, apresentam grande potencial enzimático, e seu estudo pode revelar novas perspectivas de aplicação em diferentes estratégias de biorremediação. Assim, este estudo investigou as diferentes técnicas de biorremediação: atenuação natural (AN), bioaugmentação (BA), bioaugmentação+bioestimulação (BA_BE) e bioestimulação (BE) em microcosmos de sedimentos marinhos, visando identificar a abordagem mais eficaz para a biorremediação a partir das análises funcionais (degradação de hidrocarbonetos, toxicidade, desidrogenases e NMP de microrganismos degradadores) e estruturais (*metabarcoding*) ao longo do tempo (0, 15, 45 e 90 dias). Os resultados mostraram que o consórcio microbiano selecionado, composto por microrganismos isolados da costa brasileira (*Acinetobacter beijerinckii* 28, *Microbacterium oleivorans* M9, *Sphingobium xenophagum* 41, *Alcanivorax* sp. 85C e *Paramarasmius palmivorus* CRM 593), foi eficiente na degradação de hidrocarbonetos alifáticos (alcanos) e aromáticos. Nos ensaios em microcosmos, a maior atividade das desidrogenases foi observada após 45 dias em BA_BE (30,30 μg de TFP g^{-1} de sedimento) e BE (21,54 μg de TFP g^{-1} de sedimento), enquanto o NMP não apresentou variações significativas entre os diferentes tratamentos ao longo do tempo. Nos ensaios de fitotoxicidade, a maior taxa de inibição em *Cucumis sativus* foi obtida em BA_BE (54,74%) e BE (32,09%) aos 45 dias, porém, após 90 dias de biorremediação, a fitotoxicidade foi significativamente reduzida em BA_BE. As maiores taxas de degradação dos alcanos foram obtidas nos 15 primeiros dias de experimento com BE (93,94%) e BA_BE (92,36%). Em relação à degradação dos HPAs, os melhores resultados foram com a BE (91,84%) e com a BA_BE (90,85%) no decorrer dos 45 dias de biorremediação. A análise de *metabarcoding* identificou grupos fúngicos e bacterianos potencialmente degradadores, como *Cladosporium* e *Idiomarina* em todos os tratamentos, com maior abundância nos ensaios com suplementação de nutrientes (BE) e a adição do consórcio microbiano (BA_BE), onde também foram observadas as maiores taxas de degradação. Esses resultados reforçam o potencial das estratégias de BE e BA_BE como ferramentas práticas na remediação de sedimentos marinhos contaminados.

Palavras-chave: biodegradação; hidrocarbonetos; consórcio microbiano; *metabarcoding*.

ABSTRACT

Marine ecosystem pollution by hydrocarbons poses serious environmental and social risks due to their toxic properties. The oil spill along the Brazilian coast, which impacted more than 4,000 km, underscores the urgency of developing effective strategies for marine ecosystem restoration. Bioremediation, based on microbial metabolism, is recognized for its sustainability. Indigenous degrading microorganisms in marine microbial communities exhibit great enzymatic potential, and their study may provide new insights for application in different bioremediation strategies. Accordingly, this study investigated different bioremediation techniques: natural attenuation (NA), bioaugmentation (BA), bioaugmentation + biostimulation (BA_BE), and biostimulation (BE) in marine sediment microcosms collected along the northern coast of São Paulo State, Brazil. The aim was to identify the most effective approach for bioremediation through functional analyses (hydrocarbon degradation, toxicity, dehydrogenase activity, and MPN of degrading microorganisms) and structural analyses (metabarcoding) over time (0, 15, 45, and 90 days). The results showed that the selected microbial consortium, composed of microorganisms isolated from the Brazilian coast (*Acinetobacter beijerinckii* 28, *Microbacterium oleivorans* M9, *Sphingobium xenophagum* 41, *Alcanivorax* sp. 85C e *Paramarasmius palmivorus* CRM 593), was efficient in degrading aliphatic (alkanes) and aromatic hydrocarbons. In microcosm assays, the highest dehydrogenase activity was observed after 45 days in BA_BE (30.30 $\mu\text{g TFP g}^{-1}$ of sediment) and BE (21.54 $\mu\text{g TFP g}^{-1}$ of sediment), while the MPN did not show significant variations between the different treatments over time. Phytotoxicity assays showed the highest inhibition rates in *Cucumis sativus* in BA_BE (54.74%) and BE (32.09%) at 45 days. However, after 90 days of bioremediation, phytotoxicity was significantly reduced in BA_BE. The highest alkane degradation rates were achieved within the first 15 days of the experiment in BE (93.94%) and BA_BE (92.36%). Regarding PAHs degradation, the best results were observed in BE (91.84%) and BA_BE (90.85%) over 45 days of bioremediation. Metabarcoding analysis identified potentially degrading fungal and bacterial groups, such as *Cladosporium* and *Idiomarina*, across all treatments, with higher abundance in nutrient-supplemented assays (BE) and in those with the microbial consortium added (BA_BE), where the highest degradation rates were also observed. These results reinforce the potential of BE and BA_BE strategies as practical tools for the remediation of contaminated marine sediments.

Keywords: biodegradation; hydrocarbons; microbial consortium; metabarcoding

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estrutura molecular de hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos presentes no petróleo	17
Figura 2. Estrutura molecular de (a) resinas; (b) asfaltenos presentes no petróleo	17
Figura 3. Produtos obtidos a partir da destilação fracionada do petróleo, separados de acordo com a faixa de hidrocarbonetos e ponto de ebulição	19
Figura 4. Cartogramas representando a produção e o consumo de petróleo mundial em 2024	20
Figura 5. Causas de derramamentos por petroleiros, 1970-2024	21
Figura 6. Mecanismos metabólicos no ataque inicial dos contaminantes pelas oxigenases (monooxigenases e dioxigenases)	32
Figura 7. Principais vias metabólicas aeróbicas bacterianas de hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos	34
Figura 8. Diferentes estratégias de biodegradação anaeróbica de compostos orgânicos, incluindo hidrocarbonetos poliaromáticos (HPAs)	35
Figura 9. Diferentes vias enzimáticas da degradação de HPA por fungos	36
Figura 10. Cromatograma do controle negativo	51
Figura 11. Cromatogramas dos consórcios comparados ao controle negativo	52
Figura 12. Cromatograma comparativo entre o melhor consórcio degradador avaliado neste estudo com os demais consórcios avaliados	55
Figura 13. Fitotoxicidade em <i>Cucumis sativus</i> dos consórcios	56
Figura 14. Cromatograma do consórcio selecionado para ensaios em microcosmos comparado ao melhor consórcio avaliado neste estudo	58
Figura 15. Fitotoxicidade em <i>Cucumis sativus</i> do consórcio selecionado para ensaios em microcosmos comparado ao melhor consórcio avaliado nesse estudo	59
Figura 16. Concentrações totais de alcanos analisados nos tempos 0, 15, 45 e 90 dias	63
Figura 17. Concentrações de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) analisadas nos tempos 0, 15, 45 e 90 dias	65
Figura 18. Efeito das diferentes estratégias de biorremediação de petróleo sobre o crescimento de <i>Cucumis sativus</i> ao longo do tempo	76
Figura 19. Efeito das diferentes estratégias de biorremediação de petróleo sobre a germinação de <i>Cucumis sativus</i>	78
Figura 20. Atividade da desidrogenase ao longo do tempo (0, 15, 45 e 90 dias)	80
Figura 21. Contagem de microrganismos degradadores de hidrocarbonetos ao longo do tempo (0, 15, 45 e 90 dias), estimada pelo método do Número Mais Provável (NMP)	82
Figura 22. Índices de alfa diversidade da comunidade fúngica: Shannon, Simpson, uniformidade e riqueza nos diferentes tratamentos de biorremediação ao longo do tempo	85
Figura 23. Diagrama de Venn da soma do número de ASV fúngicas	88
Figura 24. Beta diversidade das comunidades fúngicas nos sedimentos marinhos contaminados por petróleo	89
Figura 25. Abundância relativa dos principais gêneros das comunidades fúngicas de acordo com sequenciamento Illumina nas diferentes abordagens de biorremediação ao longo do tempo	90
Figura 26. Índices de alfa diversidade da comunidade bacteriana: Shannon, Simpson, uniformidade e riqueza nos diferentes tratamentos de biorremediação ao longo do tempo	96
Figura 27. Diagrama de Venn da soma do número de ASVs bacterianas	98
Figura 28. Beta diversidade das comunidades bacterianas nos sedimentos marinhos contaminados por petróleo	99

Figura 29. Abundância relativa dos principais gêneros das comunidades bacterianas de acordo com sequenciamento Illumina nas diferentes abordagens de biorremediação ao longo do tempo 101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Vantagens e desvantagens das principais técnicas convencionais de remediação de sedimentos contaminados	24
Tabela 2. Diferentes consórcios aplicados no contexto de biorremediação de hidrocarbonetos	31
Tabela 3. Isolados fúngicos e bacterianos utilizados no presente estudo	38
Tabela 4. Consórcios utilizados neste estudo	40
Tabela 5. Consórcios avaliados no mestrado de Miguel Gonçalves	40
Tabela 6. Taxa de germinação da <i>Cucumis sativus</i> expostas aos diferentes consórcios	57
Tabela 7. Caracterização granulométrica do sedimento	60
Tabela 8. Caracterização química do sedimento	61
Tabela 9. Concentrações das moléculas de alcanos obtidas com a extração realizada nas amostras de 15 dias.....	68
Tabela 10. Concentrações das moléculas de alcanos obtidas com a extração realizada nas amostras de 45 dias.....	69
Tabela 11. Concentrações das moléculas de alcanos obtidas com a extração realizada nas amostras de 90 dias.....	71
Tabela 12. Concentrações das moléculas de HPAs obtidas com a extração realizada nas amostras de 15 dias.....	72
Tabela 13. Concentrações das moléculas de HPAs obtidas com a extração realizada nas amostras de 45 dias.....	73
Tabela 14. Concentrações das moléculas de HPAs obtidas com a extração realizada nas amostras de 90 dias.....	74
Tabela 15. Índices de alfa diversidade da comunidade de fungos em sedimento marinho contaminado por petróleo nos diferentes tratamentos e tempos.....	84
Tabela 16. Índices de alfa diversidade da comunidade de bactérias em sedimento marinho contaminado por petróleo nos diferentes tratamentos e tempos.....	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AN	Atenuação natural
ANOVA	Análise de Variância
ASV	<i>Amplicon Sequence Variant</i>
ATSDR	<i>Agency for Toxic Substances and Disease Registry</i>
BA	Bioaumentação
BA_BE	Bioaumentação + bioestimulação
BE	Bioestimulação
BTEX	Benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CG-MS	Cromatografia Gasosa acoplada a Espectrometria de Massa
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
HPA	Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos
HTP	Hidrocarbonetos totais de petróleo
NMP	Número mais provável
PCoA	Análise de coordenadas principais
PCR	<i>Polymerase Chain Reaction</i>
PERMANOVA	Análise Multivariada de Variância Permutacional
TCA	<i>Tricarboxylic Acid Cycle</i>
TFP	Trifenilformazan
TTC	Cloreto de 2,3,5 – trifeniltetrazólio
VRQ	Valores de Referência de Qualidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1	Petróleo e a indústria petroquímica	16
2.2	Toxicidade do petróleo e destino ambiental	21
2.3	Biorremediação	23
2.4	Mecanismos microbianos relacionados a degradação dos hidrocarbonetos	28
3	OBJETIVO	37
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	38
4.1	Microrganismos	38
4.2	Montagem dos consórcios	39
4.2.1	Seleção do consórcio mais eficiente.....	40
4.2.2	Ensaio qualitativo da degradação do petróleo bruto (CG-MS).....	40
4.2.3	Análise da toxicidade em <i>Cucumis sativus</i>	42
4.3	Ensaio em microcosmos.....	43
4.3.1	Coleta do sedimento	43
4.3.2	Montagem dos microcosmos.....	43
4.3.2.1	Preparação dos microrganismos	45
4.4	Monitoramento da atividade microbiana	45
4.4.1	Degradação quantitativa do petróleo	45
4.4.2	Análise da fitotoxicidade.....	46
4.4.3	Atividade das desidrogenases.....	47
4.4.4	Contagem de microrganismos degradadores de óleo diesel.....	47
4.5	Caracterização da comunidade microbiana (<i>metabarcoding</i>)	48
4.5.1	Extração de DNA e amplificação	48
4.5.2	Sequenciamento e processamento	50
4.6	Análises estatísticas	50

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
5.1	Determinação do melhor consórcio degradador	51
5.1.1	Análise qualitativa da degradação do petróleo (CG-MS)	51
5.1.2	Fitotoxicidade nas análises dos consórcios	56
5.2	Caracterização do sedimento marinho	59
5.3	Ensaio em microcosmos.....	62
5.3.1	Degradação do petróleo bruto (análises de CG-MS)	62
5.3.2	Fitotoxicidade em <i>Cucumis sativus</i>	75
5.3.3	Atividade enzimática (desidrogenase)	80
5.3.4	Contagem de microrganismos degradadores (NMP)	82
5.4	Análise ecológica da comunidade microbiana.....	84
5.4.1	Diversidade alfa e beta da comunidade fúngica.....	84
5.4.1.1	Composição da comunidade fúngica.....	90
5.4.2	Diversidade alfa e beta da comunidade bacteriana	95
5.4.2.1	Composição da comunidade bacteriana	100
6	CONCLUSÕES	106
7	REFERÊNCIAS	108

1 INTRODUÇÃO

Em agosto de 2019, um derramamento de petróleo atingiu mais de 4 mil km do litoral brasileiro, afetando 11 estados do Nordeste e Sudeste (Pena et al., 2020). Cinco anos depois, comunidades impactadas ainda denunciam a falta de indenizações e de restauração do ecossistema marinho (Câmara dos Deputados, 2024). Casos como esse vêm aumentando em decorrência das atividades antropogênicas associadas à exploração e comercialização do petróleo (Kebede et al., 2021). Apesar dos combustíveis fósseis, como o petróleo, representarem a principal fonte de recursos energéticos em diversos setores (Imam et al., 2019), essas operações impactam constantemente os ecossistemas por derramamentos acidentais ou pelas atividades inadvertidas de transporte, produção e processamento (Ławniczak et al., 2020). Essa poluição provoca danos na saúde animal e humana e compromete setores econômicos que dependem dos recursos marinhos, como pesca, indústrias marítimas, aquicultura, turismo, atividades recreativas e bens culturais/naturais (Tedesco et al., 2024) devido à presença de substâncias tóxicas e persistentes (Al-hawash et al., 2018).

Diversas estratégias de remediação têm sido aplicadas para remover poluentes derivados do petróleo, incluindo técnicas físico-químicas como adsorção, contenção, incineração e uso de dispersantes químicos, que apesar de apresentar funcionalidade, exigem altos custos operacionais e de capital, além de apresentar riscos de contaminação secundária, o que as tornam pouco eficazes (Narayanan et al., 2023). Para superar essas dificuldades, a biorremediação surge como alternativa promissora para recuperar ambientes contaminados por hidrocarbonetos (Bhatt et al., 2022). Embora a determinação precisa dos custos envolvidos seja difícil, devido as variáveis ambientais, ao tipo de contaminante, a área afetada e sua extensão e às tecnologias empregadas (Tedesco et al., 2024), a biorremediação é considerada a opção mais econômica com custos entre 5-300 € por metro cúbico em comparação com 10-600 € para tratamentos físico-químicos e 50-2000 € para tratamentos térmicos como a incineração (Bianco et al., 2023; Tedesco et al., 2024).

Além das vantagens citadas, a biorremediação é um processo de remediação mais sustentável, que tem como objetivo aproveitar as vias metabólicas dos microrganismos e seus produtos para degradar, eliminar ou transformar os poluentes ambientais em formas menos recalcitrantes ou não tóxicas (Kebede et al., 2021). A diversidade de mecanismos estruturais, bioquímicos e genéticos presentes nas vias metabólicas de diferentes espécies de fungos e bactérias permite que diversos contaminantes sejam utilizados como substrato energético ou como fonte de carbono para síntese celular e aumento de biomassa (Bianco et al., 2023;

McGenity et al., 2012; Xu et al., 2018). As principais enzimas microbianas envolvidas no processo degradativo incluem as hidrolases, lipases, oxidorredutases, oxigenases e lacases (Narayanan et al., 2023).

Dentro da temática da biorremediação, é fundamental investigar os mecanismos ainda poucos explorados relacionados à função e à estrutura das comunidades microbianas, assim como os fatores ambientais e as propriedades físico-químicas dos poluentes. Considerando o impacto dos derramamentos de petróleo nos oceanos, especialmente no litoral brasileiro, a singularidade deste estudo está em sua estratégia voltada à restauração de sedimentos marinhos contaminados, contexto em que a biorremediação nesses locais ainda é pouco padronizada e executada. Dessa forma, o objetivo deste estudo foi estruturar um consórcio microbiano composto por espécies isoladas do litoral brasileiro, com histórico de degradação de hidrocarbonetos e/ou com propriedades emulsificantes. Foram testadas quatro estratégias de biorremediação (atenuação natural, bioaugmentação, bioaugmentação+bioestimulação e bioestimulação), visando encontrar a abordagem mais eficaz na degradação do petróleo em sedimentos marinhos.

Cabe destacar que o presente projeto de mestrado é parte do projeto intitulado “Biorremediação de petróleo em sedimentos e água do mar: estrutura e função de comunidades microbianas (MicroBioMaR)” fomentado pelo CNPq/MCTI (Programa Ciência no Mar) (CNPq 440774/2020-9) e sob a coordenação da Prof^a. Dra. Lara D. Sette (UNESP/Rio Claro).

6 CONCLUSÕES

Neste estudo, diferentes abordagens de biorremediação foram aplicadas para a recuperação de sedimentos marinhos contaminados com petróleo. Os experimentos em microcosmos evidenciaram que os tratamentos de BE e BA_BE foram os mais eficientes na degradação dos hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos, apresentando mais de 90% dos compostos removidos entre 15 e 45 dias de experimento. A suplementação com nutrientes (nitrogênio e fósforo), nos respectivos tratamentos, demonstrou ser um fator-chave para a otimização do processo de degradação. A análise da fitotoxicidade em *C. sativus* mostrou um aumento na toxicidade nos tratamentos onde os nutrientes foram adicionados (BA_BE e BE), sobretudo no início dos experimentos e aos 45 dias de biorremediação. No entanto, ao final do experimento (90 dias), observou-se uma redução significativa da toxicidade no tratamento de BA_BE.

As análises da diversidade da comunidade fúngica revelaram que a BE foi o único tratamento que manteve maior diversidade no índice de Shannon em relação ao controle ao longo do tempo, enquanto a AN e a BA_BE não apresentaram diferenças significativas. Quanto ao impacto do petróleo na diversidade, não foram observadas diferenças no tratamento AN e no BA_BE em relação ao controle em nenhum índice analisado ao longo do tempo.

Na comunidade bacteriana foi possível verificar a diminuição de todos os índices de alfa diversidade em todos os tratamentos comparados ao controle nos primeiros 15 dias de experimento, com exceção da riqueza, sugerindo que comunidades menos diversas, porém compostas por táxons metabolicamente mais eficientes, podem ser mais eficazes nesse contexto de biorremediação. Ao final do experimento (90 dias), houve redução significativa da diversidade em BE e BA_BE em comparação ao controle em todos os índices e em comparação com a AN nos índices de Shannon e uniformidade. Além disso, a riqueza em BE, neste mesmo tempo, foi significativamente menor em comparação com AN.

Os resultados da caracterização taxonômica mostraram que a contaminação por petróleo (1%) modulou a composição da comunidade microbiana, onde os gêneros mais abundantes foram predominantemente descritos como potenciais degradadores. O gênero fúngico *Fusarium* e os gêneros bacterianos *Halomonas*, *Alcanivorax* e *Pseudomonas*, ausentes no tempo inicial (sem tratamento), passaram a ser detectados em todos os tratamentos a partir dos 15 dias de biorremediação, evidenciando o papel dos hidrocarbonetos como fonte de carbono e energia para esses grupos.

Os dados indicaram que a comunidade autóctone apresenta alta capacidade e adaptação para remover os hidrocarbonetos de petróleo. No entanto, a suplementação com nutrientes nos tratamentos de BE e BA_BE favoreceu maior dominância de grupos específicos e degradadores, o que resultou em taxas superiores de degradação. O gênero *Halomonas*, por exemplo, destacou-se como um dos mais abundantes da comunidade bacteriana, sendo favorecido exclusivamente nesses tratamentos. Entre os gêneros mais representativos da comunidade fúngica, o *Cladosporium*, *Paraconiothyrium* e *Fusarium* destacaram-se em todos os tratamentos, enquanto nas comunidades bacterianas, *Idiomarina*, *Halomonas* e *Marinobacter* foram mais predominantes nos tratamentos de BE e BA_BE ao longo do tempo. Apesar da *Idiomarina* apresentar elevada abundância na AN nos primeiros 15 dias de biorremediação, essa abundância foi reduzida ao longo do experimento, acompanhada por uma composição distinta nos períodos de 45 e 90 dias comparada aos 15 dias iniciais. Dentre os microrganismos introduzidos, como parte do consórcio, o gênero fúngico *Marasmius* (atualmente *Paramarasmius*) foi detectado apenas ao final do experimento, já o grupo bacteriano *Alcanivorax*, embora presente, não foi exclusivo desse tratamento.

Em síntese, os resultados evidenciam que as abordagens de BE e BA_BE representam alternativas promissoras para a restauração de ambientes marinhos impactados por hidrocarbonetos de petróleo, por promoverem a seleção e o favorecimento de grupos degradadores.

7 REFERÊNCIAS

- ABBASIAN, Firouz *et al.* A Comprehensive Review of Aliphatic Hydrocarbon Biodegradation by Bacteria. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 176, n. 3, p. 670–699, 3 jun. 2015.
- ABDEL-SHAIFY, Hussein I.; MANSOUR, Mona S. M. A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation. **Egyptian Journal of Petroleum**, v. 25, n. 1, p. 107–123, mar. 2016.
- ABDULRASHEED, Mansur *et al.* Biodegradation of diesel oil by cold-adapted bacterial strains of *Arthrobacter* spp. from Antarctica. **Antarctic Science**, v. 32, n. 5, p. 341–353, 21 out. 2020.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2025 – Seção 3: Comercialização. Brasília: ANP, 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-brasileiro-do-petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis-2025#Seção>>. Acesso em: 13 de agosto de 2025.
- AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY. ATSDR, 2022. ATSRD's Substance Priority List. Disponível em: <<https://www.atsdr.cdc.gov/spl/#2022spl>>. Acesso em: 10 de outubro de 2024.
- AGHAIE-KHOUZANI, M. et al. Decolorization of some synthetic dyes using optimized culture broth of laccase producing ascomycete *Paraconiothyrium variabile*. **Biochemical Engineering Journal**, v. 60, p. 9-15, 2012.
- AITKEN, Carolyn M.; JONES, D. Martin; LARTER, Steve R. Anaerobic hydrocarbon biodegradation in deep subsurface oil reservoirs. **Nature**, v. 431, n. 7006, p. 291-294, 2004.
- AKASH, S. *et al.* Biotransformation as a tool for remediation of polycyclic aromatic hydrocarbons from polluted environment - review on toxicity and treatment technologies. **Environmental Pollution**, v. 318, p. 120923, fev. 2023.
- AL DISI, Zulfa *et al.* Considering the Specific Impact of Harsh Conditions and Oil Weathering on Diversity, Adaptation, and Activity of Hydrocarbon-Degrading Bacteria in Strategies of Bioremediation of Harsh Oily-Polluted Soils. **BioMed Research International**, v. 2017, p. 1–11, 2017.
- ALEF, Kassem. Methods in applied soil microbiology and biochemistry. London: **Academic Press**, 1995.
- AL-HAWASH, Adnan B. *et al.* Principles of microbial degradation of petroleum hydrocarbons in the environment. **The Egyptian Journal of Aquatic Research**, v. 44, n. 2, p. 71–76, jun. 2018.
- AL-HAWASH, Adnan B.; ZHANG, Xiaoyu; MA, Fuying. Removal and biodegradation of different petroleum hydrocarbons using the filamentous fungus *Aspergillus* sp. RFC-1. **MicrobiologyOpen**, v. 8, n. 1, 25 jan. 2019.

ALONSO-ALVAREZ, Carlos *et al.* Sublethal toxicity of the Prestige oil spill on yellow-legged gulls. **Environment International**, v. 33, n. 6, p. 773-781, 2007.

AL-OTIBI, Fatimah; AL-ZAHRANI, Rasha M.; MARRAIKI, Najat. Biodegradation of selected hydrocarbons by fusarium species isolated from contaminated soil samples in Riyadh, Saudi Arabia. **Journal of Fungi**, v. 9, n. 2, p. 216, 2023.

AMBAYE, Teklit Gebregiorgis *et al.* Ex-situ bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil using mixed stimulants: Response and dynamics of bacterial community and phytotoxicity. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, n. 6, p. 108814, dez. 2022.

ARREDONDO-SANTOYO, Marina; VÁZQUEZ-GARCIDUEÑAS, Ma Soledad; VÁZQUEZ-MARRUFO, Gerardo. Identification and characterization of the biotechnological potential of a wild strain of *Paraconiothyrium* sp. **Biotechnology Progress**, v. 34, n. 4, p. 846-857, 2018.

ATAKPA, Edidiong Okokon *et al.* Asynchronous application of modified biochar and exogenous fungus *Scedosporium* sp. ZYY for enhanced degradation of oil-contaminated intertidal mudflat sediment. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, n. 13, p. 20637-20650, 2024.

ATAKPA, Edidiong Okokon *et al.* Improved degradation of petroleum hydrocarbons by co-culture of fungi and biosurfactant-producing bacteria. *Chemosphere*, v. 290, p. 133337, 2022.

AYDIN, Sevcan *et al.* Aerobic and anaerobic fungal metabolism and Omics insights for increasing polycyclic aromatic hydrocarbons biodegradation. **Fungal Biology Reviews**, v. 31, n. 2, p. 61-72, 2017.

BACOSA, Hernando P. *et al.* Hydrocarbon degradation and response of seafloor sediment bacterial community in the northern Gulf of Mexico to light Louisiana sweet crude oil. **The ISME Journal**, v. 12, n. 10, p. 2532–2543, 27 out. 2018.

BAE, Seung Seob *et al.* *Marinobacterium aestuarii* sp. nov., a benzene-degrading marine bacterium isolated from estuary sediment. **International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology**, v. 68, n. 2, p. 651-656, 2018.

BALA, Saroj *et al.* Recent Strategies for Bioremediation of Emerging Pollutants: A Review for a Green and Sustainable Environment. **Toxics**, v. 10, n. 8, p. 484, 19 ago. 2022.

BANET, G. *et al.* The effects of biostimulation and bioaugmentation on crude oil biodegradation in two adjacent terrestrial oil spills of different age, in a hyper-arid region. **Journal of Environmental Management**, v. 286, p. 112248, maio 2021.

BARBIERI, Paola *et al.* **Microbiologia ambientale ed elementi di ecologia microbica**. Casa editrice ambrosiana, 2008.

BAOUNE, Hafida *et al.* Bioremediation of petroleum-contaminated soils using *Streptomyces* sp. Hlh1. **Journal of Soils and Sediments**, v. 19, n. 5, p. 2222–2230, 4 maio 2019.

BENTO, Fatima M. *et al.* Comparative bioremediation of soils contaminated with diesel oil by natural attenuation, biostimulation and bioaugmentation. **Bioresource Technology**, v. 96, n. 9, p. 1049–1055, jun. 2005.

BHATAWADEKAR, Vasudha C.; DAMARE, Samir R.; GARG, Anita. Biodegradation of mixed polycyclic aromatic hydrocarbons by *Pseudomonas* sp. isolated from estuarine sediment. **Bioremediation Journal**, v. 27, n. 2, p. 116-125, 2023.

BHATT, Pankaj *et al.* Microalgae-based removal of pollutants from wastewaters: Occurrence, toxicity and circular economy. **Chemosphere**, v. 306, p. 135576, nov. 2022.

BIANCO, Francesco *et al.* A critical review of the remediation of PAH-polluted marine sediments: current knowledge and future perspectives. **Resources, Environment and Sustainability**, v. 11, p. 100101, 2023.

BIDJA ABENA, Marie Thérèse *et al.* Crude Oil Biodegradation by Newly Isolated Bacterial Strains and Their Consortium Under Soil Microcosm Experiment. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 189, n. 4, p. 1223–1244, 24 dez. 2019.

BIRD, Lina J. *et al.* Marinobacter: A case study in bioelectrochemical chassis evaluation. **Microbial Biotechnology**, v. 16, n. 3, p. 494-506, 2023.

BIROLI, Willian G. *et al.* Biodegradation of anthracene and several PAHs by the marine-derived fungus *Cladosporium* sp. CBMAI 1237. **Marine Pollution Bulletin**, v. 129, n. 2, p. 525-533, 2018.

BRADDOCK, Joan F.; CATTERALL, Peter H. A Simple Method for Enumerating Gasoline- and Diesel-Degrading Microorganisms. **Bioremediation Journal**, v. 3, n. 2, p. 81–84, 3 abr. 1999.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 249, p. 81–84, 30 dez. 2009. Disponível em: ><https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/wp-content/uploads/sites/13/2013/11/CONAMA-420-09.pdf>< Acesso em: 18 junho de 2025.

BRAY, J. Roger; CURTIS, John T. An ordination of the upland forest communities of southern Wisconsin. **Ecological monographs**, v. 27, n. 4, p. 326-349, 1957.

BRESTOVIČOVÁ, Soňa *et al.* Comparative genomic analysis of two putative novel *Idiomarina* species from hypersaline miocene deposits. **BMC genomics**, v. 25, n. 1, p. 1007, 2024.

BRÜSCHWEILER, Beat J.; MERLOT, Cédric. Azo dyes in clothing textiles can be cleaved into a series of mutagenic aromatic amines which are not regulated yet. **Regulatory Toxicology and Pharmacology**, v. 88, p. 214–226, ago. 2017.

CÁCERES-ZAMBRANO, Jessica Zerimar *et al.* Biodegradation capabilities of filamentous fungi in high-concentration heavy crude oil environments. **Archives of Microbiology**, v. 206, n. 3, p. 123, 2024.

CALDERON, Luis J. Perez et al. Effects of pressure and temperature on deep sea hydrocarbon-degrading microbial communities in subarctic sediments. **MicrobiologyOpen**, 2018.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. Atingidos pelo maior derramamento de óleo no Brasil denunciam falta de reparação cinco anos depois. **Câmara dos Deputados — Portal**, 10 set. 2024. Disponível em: <<https://www.camara.leg.br/noticias/1095859-ATINGIDOS-PELO-MAIOR-DERRAMAMENTO-DE-OLEO-NO-BRASIL-DENUNCIAM-FALTA-DE-REPARACAO-CINCO-ANOS-DEPOIS>>. Acesso em: 9 agosto de 2025.

CANADIAN COUNCIL OF MINISTERS OF THE ENVIRONMENT (CCME). Canadian soil quality guidelines for the protection of environmental and human health (polycyclic aromatic hydrocarbons). Winnipeg: CCME, 2010. Disponível em: <<http://ceqg-rcqe.ccme.ca/download/en/320>>. Acesso em: 12 de agosto de 2025.

CETESB. Cetesb.sp.gov, 2021. Ficha de informação toxicológica de HPAs – Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2021/05/HPAs-Hidrocarbonetos-Policíclicos-Aromáticos.pdf>>. Acesso em: 10 de outubro de 2024.

CHAUDHARY, Parul et al. Nanoparticle-mediated bioremediation as a powerful weapon in the removal of environmental pollutants. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 11, n. 2, p. 109591, 2023.

CHEN, Baoliang; WANG, Yinshan; HU, Dingfei. Biosorption and biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in aqueous solutions by a consortium of white-rot fungi. **Journal of Hazardous Materials**, v. 179, n. 1–3, p. 845–851, jul. 2010.

CHEN, J. *et al.* Isolation of biosurfactant producers, optimization and properties of biosurfactant produced by *Acinetobacter* sp. from petroleum-contaminated soil. **Journal of Applied Microbiology**, v. 112, n. 4, p. 660–671, abr. 2012.

CHEN, Weiwei *et al.* Enhanced biodegradation of crude oil by constructed bacterial consortium comprising salt-tolerant petroleum degraders and biosurfactant producers. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 154, p. 105047, 2020.

CHERNIKOVA, Tatyana N. et al. Hydrocarbon-degrading bacteria *Alcanivorax* and *Marinobacter* associated with microalgae *Pavlova lutheri* and *Nannochloropsis oculata*. **Frontiers in Microbiology**, v. 11, p. 572931, 2020.

CHESHKOVA, Tatiana V. *et al.* Resins and asphaltenes of light and heavy oils: their composition and structure. **Energy & Fuels**, v. 33, n. 9, p. 7971–7982, 2019.

CHUNYAN, X. et al. The role of microorganisms in petroleum degradation: Current development and prospects. **Science of The Total Environment**, v. 865, p. 161112–161112, 1 mar. 2023.

CLARK, Michael et al. Bioremediation of industrial pollutants by insects expressing a fungal laccase. **ACS Synthetic Biology**, v. 11, n. 1, p. 308–316, 2021.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB); AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidas. Organizadores: Carlos Jesus Brandão et al. São Paulo: CETESB; Brasília: ANA, 2011. Disponível em: <<https://repositorio.cetesb.sp.gov.br/items/8a791941-ad42-462f-98e1-e0ff6c733e9d/full>>. Acesso em: 12 de maio de 2025.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº. 357, de 17 de março de 2005: Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Publicada no DOU nº 053, de 18/03/2005, págs. 58-63. Disponível em: <https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=450> Acesso em 18 de junho de 2025.

CORTESELLI, Elizabeth M.; AITKEN, Michael D.; SINGLETON, David R. Description of *Immundisolibacter cernigliae* gen. nov., sp. nov., a high-molecular-weight polycyclic aromatic hydrocarbon-degrading bacterium within the class Gammaproteobacteria, and proposal of *Immundisolibacterales* ord. nov. and *Immundisolibacteraceae* fam. nov. **International journal of systematic and evolutionary microbiology**, v. 67, n. 4, p. 925-931, 2017

CORTI MONZÓN, Georgina et al. New findings on aromatic compounds' degradation and their metabolic pathways, the biosurfactant production and motility of the halophilic bacterium *Halomonas* sp. KHS3. **Current microbiology**, v. 75, n. 8, p. 1108-1118, 2018.

COURT, M. N.; STEPHEN, R. C.; WAID, J. S. Toxic Effect of Urea on Plants: Nitrite Toxicity arising from the Use of Urea as a Fertilizer. **Nature**, v. 194, n. 4835, p. 1263–1265, jun. 1962.

COURT, M. N.; STEPHEN, R. C.; WAID, J. S. TOXICITY AS A CAUSE OF THE INEFFICIENCY OF UREA AS A FERTILIZER. I. REVIEW. **Journal of Soil Science**, v. 15, n. 1, p. 42–48, 28 mar. 1964.

CRAVO-LAUREAU, Cristiana; DURAN, Robert. Marine coastal sediments microbial hydrocarbon degradation processes: contribution of experimental ecology in the omics' era. **Frontiers in Microbiology**, v. 5, p. 39, 2014.

CRUZ, Jaqueline Matos *et al.* Comparative study of phytotoxicity and genotoxicity of soil contaminated with biodiesel, diesel fuel and petroleum. **Ecotoxicology**, v. 28, n. 4, p. 449-456, 2019.

CRUZ, Jaqueline Matos *et al.* Phytotoxicity of Soil Contaminated with Petroleum Derivatives and Biodiesel. **Ecotoxicology and Environmental Contamination**, v. 8, n. 1, p. 49–54, 18 jun. 2013.

DACCÒ, C. *et al.* Key fungal degradation patterns, enzymes and their applications for the removal of aliphatic hydrocarbons in polluted soils: A review. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 147, p. 104866, 2020.

DADOS, Angelos *et al.* Rapid remediation of soil heavily contaminated with hydrocarbons: a comparison of different approaches. **Annals of Microbiology**, v. 65, n. 1, p. 241–251, 22 mar. 2015.

DAS, Nilanjana; CHANDRAN, Preethy. Microbial degradation of petroleum hydrocarbon contaminants: an overview. **Biotechnology research international**, v. 2011, n. 1, p. 941810, 2011.

DAWSON, Katherine S. *et al.* Anaerobic biodegradation of the isoprenoid biomarkers pristane and phytane. **Organic Geochemistry**, v. 65, p. 118–126, dez. 2013.

DE LA CUEVA, Sergio Cisneros *et al.* Changes in Bacterial Populations During Bioremediation of Soil Contaminated with Petroleum Hydrocarbons. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 227, n. 3, p. 91, 26 mar. 2016.

DE MELO CARLOS, Layssa *et al.* Bioprospecting the potential of the microbial community associated to Antarctic marine sediments for hydrocarbon bioremediation. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 55, n. 1, p. 471-485, 2024.

DELL'ANNO, Filippo *et al.* Bacteria, fungi and microalgae for the bioremediation of marine sediments contaminated by petroleum hydrocarbons in the omics era. **Microorganisms**, v. 9, n. 8, p. 1695, 2021.

DENG, Linjie *et al.* Comparative effects of chemical dispersants and rhamnolipid biosurfactants on oil biodegradation and microbial community in coastal sediments. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 196, p. 105913, 2025.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). DNIT 443/2023 – ME: solos – ensaio de compactação utilizando moldes tripartidos – método de ensaio. Ministério dos Transportes, 2023. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/857790706/dnit-443-2023-me>. Acesso em: 31 de maio de 2025.

DE QUEIROZ, Livia Pinheiro *et al.* Alcanivorax strains detected among the cultured bacterial community from oiled sediments collected in Brazilian coast affected by oil spill in 2019. **Fuel**, v. 374, p. 132425, 2024.

DESFORGES, Jean-Pierre W. *et al.* Immunotoxic effects of environmental pollutants in marine mammals. **Environment international**, v. 86, p. 126-139, 2016.

DONG, Chunming *et al.* Draft Genome Sequence of *Sphingobium* sp. Strain C100, a Polycyclic Aromatic Hydrocarbon-Degrading Bacterium from the Deep-Sea Sediment of the Arctic Ocean. **Genome Announcements**, v. 2, n. 1, 27 fev. 2014.

DUTRA, Joyce *et al.* Effective biocorrosive control in oil industry facilities: 16S rRNA gene metabarcoding for monitoring microbial communities in produced water. **Microorganisms**, v. 11, n. 4, p. 846, 2023.

E., Thomassin-Lacroix *et al.* Biostimulation and bioaugmentation for on-site treatment of weathered diesel fuel in Arctic soil. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 59, n. 4–5, p. 551–556, 1 jan. 2002.

ELLIS, Madison *et al.* Hydrocarbon biodegradation potential of microbial communities from high Arctic beaches in Canada's Northwest Passage. **Marine Pollution Bulletin**, v. 174, p. 113288, 2022.

ESPINOLA, Aída. **Ouro Negro: Petróleo no Brasil de Lobato DNPM-163 e Tupi RJS-646**. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2013. v. 1

ESPINOSA-ORTIZ, Erika J.; RENE, Eldon R.; GERLACH, Robin. Potential use of fungal-bacterial co-cultures for the removal of organic pollutants. **Critical reviews in biotechnology**, v. 42, n. 3, p. 361-383, 2022.

EULISS, Katy *et al.* Greenhouse and field assessment of phytoremediation for petroleum contaminants in a riparian zone. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 6, p. 1961–1971, abr. 2008.

FALLAHI, Maryam; SAREMPOUR, Mohammadsaeed; MIRZADI GOHARI, Amir. Potential biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and petroleum hydrocarbons by indigenous fungi recovered from crude oil-contaminated soil in Iran. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 22153, 2023.

FETHI, Sami; RAHUMA, Abdulhamid. The impact of eco-innovation on CO2 emission reductions: Evidence from selected petroleum companies. **Structural Change and Economic Dynamics**, v. 53, p. 108–115, jun. 2020.

FOUAD, Farida Ah. *et al.* Role of Microorganisms in Biodegradation of Pollutants. *In: Handbook of Biodegradable Materials*. Cham: Springer International Publishing, 2022. p. 1–40.

GALAŻKA, Anna *et al.* Fungal community, metabolic diversity, and glomalin-related soil proteins (GRSP) content in soil contaminated with crude oil after long-term natural bioremediation. **Frontiers in Microbiology**, v. 11, p. 572314, 2020.

GALITSKAYA, Polina *et al.* Response of bacterial and fungal communities to high petroleum pollution in different soils. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 164, 2021.

GARDES, M.; BRUNS, T. D. ITS primers with enhanced specificity for basidiomycetes - application to the identification of mycorrhizae and rusts. **Molecular Ecology**, v. 2, n. 2, p. 113–118, abr. 1993.

GAUR, Vivek K. *et al.* Holistic approach to waste mobil oil bioremediation: Valorizing waste through biosurfactant production for soil restoration. **Journal of Environmental Management**, v. 348, p. 119207, dez. 2023.

GAUTHIER, Michel J. *et al.* *Marinobacter hydrocarbonoclasticus* gen. nov., sp. nov., a new, extremely halotolerant, hydrocarbon-degrading marine bacterium. **International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology**, v. 42, n. 4, p. 568-576, 1992.

GHANBARI, Mahdi *et al.* Exploring the microbial diversity in oil-contaminated mangrove sediments using 16S rRNA metagenomics. **bioRxiv**, p. 735290, 2019.

GHORBANNEZHAD, Hassan; MOGHIMI, Hamid; DASTGHEIB, Seyed Mohammad Mehdi. Biodegradation of high molecular weight hydrocarbons under saline condition by halotolerant *Bacillus subtilis* and its mixed cultures with *Pseudomonas* species. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 13227, 2022.

GHORBANNEZHAD, Hassan; MOGHIMI, Hamid; DASTGHEIB, Seyed Mohammad Mehdi. Evaluation of heavy petroleum degradation using bacterial-fungal mixed cultures. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 164, p. 434-439, 2018.

GHOSAL, Debajyoti *et al.* Current state of knowledge in microbial degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): a review. **Frontiers in microbiology**, v. 7, p. 1369, 2016.

GIOVANELLA, Patricia *et al.* Metal and organic pollutants bioremediation by extremophile microorganisms. **Journal of Hazardous Materials**, v. 382, p. 121024, jan. 2020.

GIOVANELLA, Patricia *et al.* Effect of biostimulation and bioaugmentation on hydrocarbon degradation and detoxification of diesel-contaminated soil: a microcosm study. **Journal of Microbiology**, v. 59, n. 7, p. 634–643, 15 jul. 2021.

GIOVANELLA, Patricia *et al.* A comprehensive study on diesel oil bioremediation under microcosm conditions using a combined microbiological, enzymatic, mass spectrometry, and metabarcoding approach. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 45, p. 101250–101266, 30 ago. 2023.

GRAJ, Weronika *et al.* Bioaugmentation with petroleum-degrading consortia has a selective growth-promoting impact on crop plants germinated in diesel oil-contaminated soil. **Water, air, & soil pollution**, v. 224, n. 9, p. 1676, 2013.

GRAN-SCHEUCH, Alejandro *et al.* Isolation and Characterization of Phenanthrene Degrading Bacteria from Diesel Fuel-Contaminated Antarctic Soils. **Frontiers in Microbiology**, v. 8, 28 ago. 2017.

GUPTA, Rangan; PIERDZIOCH, Christian; SALISU, Afees A. Oil-price uncertainty and the U.K. unemployment rate: A forecasting experiment with random forests using 150 years of data. **Resources Policy**, v. 77, p. 102662, ago. 2022.

GUPTA, Shalini; PATHAK, Bhawana; RAVI, Raman Kumar. Biodegradation of naphthalene using biosurfactant producing *Fusarium proliferatum* WC416 isolated from refinery effluent. **Applied biochemistry and biotechnology**, v. 196, n. 5, p. 2549-2565, 2024.

GURKOK, Sumeyra. Important parameters necessary in the bioreactor for the mass production of biosurfactants. *In: Green Sustainable Process for Chemical and Environmental Engineering and Science*. [S.l.]: Elsevier, 2021. p. 347–365.

HAIDER, Fasih Ullah *et al.* Phytotoxicity of petroleum hydrocarbons: Sources, impacts and remediation strategies. **Environmental Research**, v. 197, p. 111031, jun. 2021.

- HAMAD, Asmaa A. *et al.* Petroleum hydrocarbon bioremediation using native fungal isolates and consortia. **The Scientific World Journal**, v. 2021, n. 1, p. 6641533, 2021.
- HASANUZZAMAN, Mohammad *et al.* Degradation of long-chain n-alkanes (C36 and C40) by *Pseudomonas aeruginosa* strain WatG. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 59, n. 1, p. 40–43, jan. 2007.
- HARWATI, Theresia Umi *et al.* *Tropicibacter naphthalenivorans* gen. nov., sp. nov., a polycyclic aromatic hydrocarbon-degrading bacterium isolated from Semarang Port in Indonesia. **International journal of systematic and evolutionary microbiology**, v. 59, n. 2, p. 392-396, 2009.
- HASSANSHAHIAN, Mehdi *et al.* Comparison of Oil Degrading Microbial Communities in Sediments from the Persian Gulf and Caspian Sea. **Soil and Sediment Contamination: An International Journal**, v. 19, n. 3, p. 277–291, 30 abr. 2010.
- HE, Lin *et al.* Interfacial sciences in unconventional petroleum production: from fundamentals to applications. **Chemical Society Reviews**, v. 44, n. 15, p. 5446-5494, 2015.
- HE, Xiao-ling *et al.* Efficient degradation of Azo dyes by a newly isolated fungus *Trichoderma tomentosum* under non-sterile conditions. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 150, p. 232–239, abr. 2018.
- HEGAZY, Ghada E. *et al.* Isolation and characterization of *Candida tropicalis* B: a promising yeast strain for biodegradation of petroleum oil in marine environments. **Microbial Cell Factories**, v. 23, n. 1, p. 20, 2024.
- HENTATI, Dorra *et al.* Investigation of halotolerant marine *Staphylococcus* sp. CO100, as a promising hydrocarbon-degrading and biosurfactant-producing bacterium, under saline conditions. **Journal of Environmental Management**, v. 277, p. 111480, 2021.
- HERRERO, M.; STUCKEY, D. C. Bioaugmentation and its application in wastewater treatment: A review. **Chemosphere**, v. 140, p. 119–128, dez. 2015.
- HKIRI, Neila *et al.* Ability of marine-derived fungi isolated from polluted saline environment for enzymatic hydrocarbon remediation. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 54, n. 3, p. 1983-2000, 2023.
- IHRMARK, Katarina *et al.* New primers to amplify the fungal ITS2 region—evaluation by 454-sequencing of artificial and natural communities. **FEMS microbiology ecology**, v. 82, n. 3, p. 666-677, 2012.
- IMAM, Arfin *et al.* Analytical approaches used in monitoring the bioremediation of hydrocarbons in petroleum-contaminated soil and sludge. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 118, p. 50–64, set. 2019.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Oil 2025: Analysis and forecast to 2030 – Executive Summary. Paris; [s.l.]: IEA, June 2025. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/oil-2025/executive-summary>>. Acesso em: 13 de agosto de 2025.

ITOPF. **Oil Tanker Spill Statistics 2023**. Disponível em: <<https://www.itopf.org/knowledge-resources/data-statistics/statistics/>>. Acesso em: 13 de agosto de 2025.

IWABUCHI, Tokuro. Phenanthrene-degrading *Sphingobium xenophagum* are widely distributed in the western Pacific Ocean. **Canadian Journal of Microbiology**, v. 68, n. 5, p. 315–328, maio 2022.

IWAKI, Hiroaki; NISHIMURA, Ayaka; HASEGAWA, Yoshie. *Tropicibacter phthalicus* sp. nov., a phthalate-degrading bacterium from seawater. **Current microbiology**, v. 64, n. 4, p. 392-396, 2012.

JAGABA, Ahmad Hussaini *et al.* Diverse sustainable materials for the treatment of petroleum sludge and remediation of contaminated sites: A review. **Cleaner Waste Systems**, v. 2, p. 100010, jul. 2022.

JAISWAL, Shweta; SINGH, Dileep Kumar; SHUKLA, Pratyosh. Gene editing and systems biology tools for pesticide bioremediation: a review. **Frontiers in microbiology**, v. 10, p. 87, 2019.

JIANG, Zhibing *et al.* Advance in the toxic effects of petroleum water accommodated fraction on marine plankton. **Acta Ecologica Sinica**, v. 30, n. 1, p. 8–15, fev. 2010.

KEBEDE, Gessesse *et al.* Factors Influencing the Bacterial Bioremediation of Hydrocarbon Contaminants in the Soil: Mechanisms and Impacts. **Journal of Chemistry**, v. 2021, p. 1–17, 15 nov. 2021.

KEITH, Lawrence H. The source of US EPA's sixteen PAH priority pollutants. **Polycyclic Aromatic Compounds**, v. 35, n. 2-4, p. 147-160, 2015.

KERTESZ*, M. A.; KAWASAKI, A. Hydrocarbon-Degrading Sphingomonads: Sphingomonas, Sphingobium, Novosphingobium, and Sphingopyxis. In: **Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. p. 1693–1705.

KHAN, Muhammad Atikul Islam *et al.* Toxicity assessment of fresh and weathered petroleum hydrocarbons in contaminated soil- a review. **Chemosphere**, v. 212, p. 755–767, dez. 2018a.

KHAN, Muhammad Atikul Islam *et al.* Toxicity assessment of fresh and weathered petroleum hydrocarbons in contaminated soil- a review. **Chemosphere**, v. 212, p. 755–767, dez. 2018b.

KLIMCZYK, Marta; SICZEK, Anna; SCHIMMELPFENNIG, Lech. Improving the efficiency of urea-based fertilization leading to reduction in ammonia emission. **Science of The Total Environment**, v. 771, p. 145483, jun. 2021.

KLINDWORTH, Anna *et al.* Evaluation of general 16S ribosomal RNA gene PCR primers for classical and next-generation sequencing-based diversity studies. **Nucleic Acids Research**, v. 41, n. 1, p. e1–e1, 1 jan. 2013.

KOSTKA, Joel E. et al. Hydrocarbon-degrading bacteria and the bacterial community response in Gulf of Mexico beach sands impacted by the Deepwater Horizon oil spill. **Applied and environmental microbiology**, v. 77, n. 22, p. 7962-7974, 2011.

KOUR, Divjot *et al.* Beneficial microbiomes for bioremediation of diverse contaminated environments for environmental sustainability: present status and future challenges. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 20, p. 24917–24939, 25 maio 2021.

KUMAR, N. Satya Vijaya et al. Role of nanotechnology and artificial intelligence (AI) in waste management. In: **Recent Advances in Bioprocess Engineering and Bioreactor Design**. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. p. 263-286.

LACERDA, Ana L. d F. *et al.* Diverse groups of fungi are associated with plastics in the surface waters of the Western South Atlantic and the Antarctic Peninsula. **Molecular Ecology**, v. 29, n. 10, p. 1903-1918, 2020.

ŁAWNICZAK, Łukasz *et al.* Microbial Degradation of Hydrocarbons—Basic Principles for Bioremediation: A Review. **Molecules**, v. 25, n. 4, p. 856, 14 fev. 2020.

ŁEBKOWSKA, Maria *et al.* Bioremediation of soil polluted with fuels by sequential multiple injection of native microorganisms: Field-scale processes in Poland. **Ecological Engineering**, v. 37, n. 11, p. 1895–1900, nov. 2011.

LEE, Dong Hyeon; KIM, Seung Bum. Quorum Quenching Potential of *Reyranella* sp. Isolated from Riverside Soil and Description of *Reyranella humidisoli* sp. nov. **Journal of Microbiology**, v. 62, n. 6, p. 449-461, 2024.

LEE, Dong Wan et al. Biosurfactant-assisted bioremediation of crude oil by indigenous bacteria isolated from Taean beach sediment. **Environmental pollution**, v. 241, p. 254-264, 2018.

LI, Guoqiang *et al.* Microbial Abundance and Community Composition Influence Production Performance in a Low-Temperature Petroleum Reservoir. **Environmental Science & Technology**, v. 48, n. 9, p. 5336–5344, 6 maio 2014.

LI, Hui *et al.* Molecular detection, quantification and distribution of alkane-degrading bacteria in production water from low temperature oilfields. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 76, p. 49–57, jan. 2013.

LI, Yong-Quan et al. Metagenomics-metabolomics analysis of microbial function and metabolism in petroleum-contaminated soil. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 54, n. 2, p. 935-947, 2023

LI, Yong-Quan et al. Petroleum pollution affects soil chemistry and reshapes the diversity and networks of microbial communities. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 246, p. 114129, 2022.

LING, Hao *et al.* Surfactant-enhanced bioremediation of petroleum-contaminated soil and microbial community response: A field study. **Chemosphere**, v. 322, p. 138225, 2023.

- LING, Juan et al. Fungal community successions in rhizosphere sediment of seagrasses *Enhalus acoroides* under PAHs stress. **International journal of molecular sciences**, v. 16, n. 6, p. 14039-14055, 2015.
- LISTE, Hans-Holger; FELGENTREU, Dieter. Crop growth, culturable bacteria, and degradation of petrol hydrocarbons (PHCs) in a long-term contaminated field soil. **Applied Soil Ecology**, v. 31, n. 1–2, p. 43–52, jan. 2006.
- LOEHR, Raymond C.; WEBSTER, Matthew T. Performance of long-term, field-scale bioremediation processes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 50, n. 2–3, p. 105–128, out. 1996.
- LOFRANO, Giusy et al. In situ remediation of contaminated marinesediment: an overview. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 6, p. 5189-5206, 2017.
- LOGESHWARAN, Panneerselvan et al. Petroleum hydrocarbons (PH) in groundwater aquifers: An overview of environmental fate, toxicity, microbial degradation and risk-based remediation approaches. **Environmental technology & innovation**, v. 10, p. 175-193, 2018.
- LU, Lu *et al.* Rhamnolipid biosurfactants enhance microbial oil biodegradation in surface seawater from the North Sea. **ACS ES&T Water**, v. 3, n. 8, p. 2255-2266, 2023.
- LUSTOSA, Maria. **Meio ambiente, inovação e competitividade na Indústria Brasileira: a cadeia produtiva do petróleo**. Tese (Doutorado em Economia) —Rio de Janeiro : Universidade Federal do Rio de Janeiro - Instituto de Economia , 2002.
- LYU, Lina et al. Degradation potential of alkanes by diverse oil-degrading bacteria from deep-sea sediments of Haima cold seep areas, South China Sea. **Frontiers in Microbiology**, v. 13, p. 920067, 2022.
- MAAMAR, Ahlem et al. Highlighting the crude oil bioremediation potential of marine fungi isolated from the Port of Oran (Algeria). **Diversity**, v. 12, n. 5, p. 196, 2020.
- MA, Xiao-Kui; DING, Ning; PETERSON, Eric Charles. Bioaugmentation of soil contaminated with high-level crude oil through inoculation with mixed cultures including *Acremonium* sp. **Biodegradation**, v. 26, n. 3, p. 259–269, 1 jun. 2015.
- MACAULAY, Babajide. Understanding the behaviour of oil-degrading micro-organism to enhance the microbial remediation of spilled petroleum. **Applied Ecology and Environmental Research**, v. 13, n. 1, 5 abr. 2015.
- MANGO, Frank D. Os hidrocarbonetos leves no petróleo: uma revisão crítica. **Organic Geochemistry**, v. 26, n. 7-8, p. 417-440, 1997.
- MASAKORALA, Kanaji *et al.* Phytotoxicity of Long-Term Total Petroleum Hydrocarbon-Contaminated Soil—A Comparative and Combined Approach. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 224, n. 5, p. 1553, 16 maio 2013.
- MCGENITY, Terry J. *et al.* Marine crude-oil biodegradation: a central role for interspecies interactions. **Aquatic biosystems**, v. 8, n. 1, p. 10, 2012.

MECKENSTOCK, Rainer U. *et al.* Anaerobic Degradation of Benzene and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. **Microbial Physiology**, v. 26, n. 1–3, p. 92–118, 2016.

MEHARIYA, Sanjeet *et al.* Co-digestion of food waste and sewage sludge for methane production: Current status and perspective. **Bioresource Technology**, v. 265, p. 519–531, out. 2018.

MEYER, DANIEL D. *et al.* Simulation of a surface spill of different diesel/biodiesel mixtures in an ultisol, using natural attenuation and bioaugmentation/biostimulation. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 3, p. 2741–2752, set. 2018.

MITTER, Eduardo K.; GERMIDA, James J.; DE FREITAS, J. Renato. Impact of diesel and biodiesel contamination on soil microbial community activity and structure. **Scientific reports**, v. 11, n. 1, p. 10856, 2021.

MOHAMMADI, Mahasti *et al.* Microbial community response to biostimulation and bioaugmentation in crude oil-polluted sediments of the Persian Gulf. **Environmental Research**, v. 249, p. 118197, 2024.

MOLINA, Debora Conde *et al.* Organic Waste Mixtures for Improving Hydrocarbon Bioremediation in Chronically Polluted Soil. **International Journal of Environmental Research**, v. 19, n. 4, p. 150, 2025.

MONTAGNOLLI, Renato Nallin; LOPES, Paulo Renato Matos; BIDOIA, Ederio Dino. Screening the Toxicity and Biodegradability of Petroleum Hydrocarbons by a Rapid Colorimetric Method. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 68, n. 2, p. 342–353, 24 fev. 2015.

MONTES-MONTES, Gustavo *et al.* Microbial Diversity and Heavy Metal Resistome in Slag-Contaminated Soils from an Abandoned Smelter in Chihuahua, Mexico. **Soil Systems**, v. 9, n. 2, p. 30, 2025.

MORGAN, Charity J. Use of proper statistical techniques for research studies with small samples. **American Journal of Physiology-Lung Cellular and Molecular Physiology**, v. 313, n. 5, p. L873-L877, 2017.

MOROZOVA, A. V.; VOLKOVA, G. I. Effect of the petroleum resin structure on the properties of a petroleum-like system. **Petroleum Chemistry**, v. 59, n. 10, p. 1153-1160, 2019.

MULLIGAN, Catherine N. Recent advances in the environmental applications of biosurfactants. **Current Opinion in Colloid & Interface Science**, v. 14, n. 5, p. 372-378, 2009.

MUNOZ-RIVERA, Maria-Pilar *et al.* Population dynamics of a bacterial consortium from a marine sediment of the Gulf of Mexico during biodegradation of the aromatic fraction of heavy crude oil. **International Microbiology**, p. 1-11, 2025.

MUTHUKUMAR, Balakrishnan *et al.* Characterization of two novel strains of *Pseudomonas aeruginosa* on biodegradation of crude oil and its enzyme activities. **Environmental Pollution**, v. 304, p. 119223, jul. 2022.

NAGKIRTI, Pradnya *et al.* Bioremediation of terrestrial oil spills: Feasibility Assessment. In: **Optimization and applicability of bioprocesses**. Singapore: Springer Singapore, 2018. p. 141-173.

NAIK, Bharati; SASIKUMAR, Jayaprakash; DAS, Shankar Prasad. From skin and gut to the brain: the infectious journey of the human commensal fungus *malassezia* and its neurological consequences. **Molecular Neurobiology**, v. 62, n. 1, p. 533-556, 2025.

NARAYANAN, Mathiyazhagan; ALI, Sameh Samir; EL-SHEEKH, Mostafa. A comprehensive review on the potential of microbial enzymes in multipollutant bioremediation: Mechanisms, challenges, and future prospects. **Journal of Environmental Management**, v. 334, p. 117532, 2023.

NITSCHKE, M.; PASTORE, G. M. Biossurfactantes: propriedades e aplicações. **Química Nova, Campinas**, v. 25, n. 5, p. 821-826, set. 2002.

NOGUEIRA, Osvaldo Manuel Núñez *et al.* Isolation of marine-derived filamentous fungi and their potential application for bioremediation process. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 55, n. 4, p. 3403-3412, 2024.

NZILA, Alexis. Biodegradation of high-molecular-weight polycyclic aromatic hydrocarbons under anaerobic conditions: Overview of studies, proposed pathways and future perspectives. **Environmental Pollution**, v. 239, p. 788-802, 2018.

NZILA, Alexis *et al.* Degradation of benzo[a]pyrene by halophilic bacterial strain *Staphylococcus haemolyticus* strain 10SBZ1A. **PLOS ONE**, v. 16, n. 2, p. e0247723, 25 fev. 2021.

OGBO, Erute Magdalene. Effects of diesel fuel contamination on seed germination of four crop plants-*Arachis hypogaea*, *Vigna unguiculata*, *Sorghum bicolor* and *Zea mays*. **African journal of Biotechnology**, v. 8, n. 2, 2009.

OH, Yoosun *et al.* Five *Pyrenochaetopsis* Strains Isolated from Freshwater in Korea. **Korean Journal of Mycology**, v. 53, n. 2, 2025.

OMENNA, Emmanuel Chukwuma *et al.* Bio-augmentation and bio-stimulation with kenaf core enhanced bacterial enzyme activities during bio-degradation of petroleum hydrocarbon in polluted soil. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 8, 2024.

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

OTHMAN, Ahmad Razi *et al.* Potential of indigenous biosurfactant-producing fungi from real crude oil sludge in total petroleum hydrocarbon degradation and its future research prospects. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, n. 3, p. 107621, 2022.

OTTONI, Júlia Ronzella et al. DNA metabarcoding from microbial communities recovered from stream and its potential for bioremediation processes. **Current microbiology**, v. 79, n. 2, p. 70, 2022.

OTTONI, Júlia Ronzella; PASSARINI, Michel Rodrigo Zambrano; BONUGLI-SANTOS, Rafaella Costa. Metabarcoding approach in identifying potential pollutant degraders. In: **Omics Insights in Environmental Bioremediation**. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. p. 665-681

OYETIBO, Ganiyu O. et al. Ecological risk potentials of petroleum hydrocarbons and heavy metals shape the bacterial communities of marine hydrosphere at Atlantic Ocean, Atlas Cove, Nigeria. **Journal of Environmental Management**, v. 289, p. 112563, 2021.

PANDOLFO, Emiliana; BARRA CARACCIOLO, Anna; ROLANDO, Ludovica. Recent advances in bacterial degradation of hydrocarbons. **Water**, v. 15, n. 2, p. 375, 2023

PARK, Yujun et al. Characteristics of *Malassezia furfur* at various pH and effects of *Malassezia* lipids on skin cells. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 108, n. 1, p. 455, 2024.

PATEL, Anil Kumar *et al.* Organic wastes bioremediation and its changing prospects. **Science of The Total Environment**, v. 824, p. 153889, jun. 2022.

PATOWARY, Kaustuvmani *et al.* Development of an efficient bacterial consortium for the potential remediation of hydrocarbons from contaminated sites. **Frontiers in microbiology**, v. 7, p. 1092, 2016.

PELLIZZER, Elisa P. et al. Marine-derived fungus *Paramarasmius palmivorus* CBMAI 1062 applied to sulphur indigo blue decolorization, degradation and detoxification. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 96, n. 4, p. e20230315, 2024.

PENA, Paulo *et al.* Derramamento de óleo bruto na costa brasileira em 2019: emergência em saúde pública em questão. **Cadernos de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 36, n. 2, p. e00231019, 2020.

PENG, Chao et al. Time-and compound-dependent microbial community compositions and oil hydrocarbon degrading activities in seawater near the Chinese Zhoushan Archipelago. **Marine pollution bulletin**, v. 152, p. 110907, 2020.

PETROVA, L. M. *et al.* Structural features of asphaltene and petroleum resin fractions. **Petroleum Chemistry**, v. 51, n. 4, p. 252-256, 2011

PHULPOTO, Irfan Ali *et al.* Effect of natural microbiome and culturable biosurfactants-producing bacterial consortia of freshwater lake on petroleum-hydrocarbon degradation. **Science of the Total Environment**, v. 751, p. 141720, 2021.

PI, Yongrui *et al.* The contribution of chemical dispersants and biosurfactants on crude oil biodegradation by *Pseudomonas* sp. LSH-7'. **Journal of Cleaner Production**, v. 153, p. 74-82, 2017.

QIAGEN. DNeasy® PwerSoil® Pro Kits Handbook. Hilden: QIAGEN, jun. 2023. Disponível em: <<https://www.qiagen.com/us/products/discovery-and-translational-research/dna-rnapurification/dna-purification/microbial-dna/dneasy-powersoil-pro-kit>>. Acesso em: 28 de abril de 2025.

QIAN, Xiujuan *et al.* Biotechnological potential and applications of microbial consortia. **Biotechnology Advances**, v. 40, p. 107500, maio 2020.

QIAO, Yanlu *et al.* Bacterial specialists playing crucial roles in maintaining system stability and governing microbial diversity in bioremediation of oil-polluted sediments under typical deep-sea condition. **Bioresource Technology**, v. 413, p. 131498, 2024.

QUINTELLA, Cristina M.; MATA, Ana MT; LIMA, Leandro CP. Overview of bioremediation with technology assessment and emphasis on fungal bioremediation of oil contaminated soils. **Journal of environmental management**, v. 241, p. 156-166, 2019.

RADICE, R. P. *et al.* Crude oil bioremediation: from bacteria to microalgae. *Processes* 11 (2): 442 [em linha]. 2023.

RAJA, Huzefa A.; SHEARER, Carol A. *Arnim gigantosporum*, a new ascomycete species from fresh water in Florida. **Fungal Diversity**, v. 22, n. 1, p. 219-225, 2006.

RAJBONGSHI, Amarjit; GOGOI, Subrata Borgohain. A review on anaerobic microorganisms isolated from oil reservoirs. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 37, n. 7, p. 111, 2021.

RANA, Muhammad Ajmal; MAHMOOD, Rashid; ALI, Sajid. Soil urease inhibition by various plant extracts. **PLOS ONE**, v. 16, n. 10, p. e0258568, 14 out. 2021.

REHMAN, Ramla *et al.* Crude oil biodegradation potential of biosurfactant-producing *Pseudomonas aeruginosa* and *Meyerozyma* sp. **Journal of Hazardous Materials**, v. 418, p. 126276, 2021.

REN, Yulian *et al.* Specialist species of fungi and bacteria are more important than the intermediate and generalist species in near-urban agricultural soils. **Applied Soil Ecology**, v. 188, p. 104894, 2023.

REZAEI SOMEI, Maryam *et al.* Distinct microbial community along the chronic oil pollution continuum of the Persian Gulf converge with oil spill accidents. **Scientific reports**, v. 11, n. 1, p. 11316, 2021.

REZAEI, Zeinab; MOGHIMI, Hamid. Fungal-bacterial consortia: A promising strategy for the removal of petroleum hydrocarbons. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 280, p. 116543, 2024.

ROHRBACHER, Fanny; ST-ARNAUD, Marc. Root exudation: the ecological driver of hydrocarbon rhizoremediation. **Agronomy**, v. 6, n. 1, p. 19, 2016.

ROJO, Fernando. Degradation of alkanes by bacteria. **Environmental Microbiology**, v. 11, n. 10, p. 2477–2490, out. 2009.

ROSHANDEL, Farzaneh *et al.* Mycoremediation of oil contaminant by *Pleurotus florida* (P.Kumm) in liquid culture. **Fungal Biology**, v. 125, n. 9, p. 667–678, set. 2021.

ROVIRA, Joaquim; DOMINGO, José L. Human health risks due to exposure to inorganic and organic chemicals from textiles: A review. **Environmental Research**, v. 168, p. 62–69, jan. 2019.

SAFDARI, Mohammad-Saeed *et al.* Development of bioreactors for comparative study of natural attenuation, biostimulation, and bioaugmentation of petroleum-hydrocarbon contaminated soil. **Journal of Hazardous Materials**, v. 342, p. 270-278, 2018.

SALES DA SILVA, Israel Gonçalves *et al.* Soil Bioremediation: Overview of Technologies and Trends. **Energies**, v. 13, n. 18, p. 4664, 8 set. 2020.

SANTOS, Gabriel. Seleção de microrganismos de origem marinha para obtenção de consórcio degradador de petróleo. Rio Claro: Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2024.

SÃO PAULO (Estado). COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. Relatório de Qualidade das Costeiras do Estado de São Paulo – 2023. São Paulo: CETESB, 2024. Disponível em: ><https://cetesb.sp.gov.br/aguas-costeiras/wp-content/uploads/sites/2/2024/09/Relatorios-de-Qualidade-das-Costeiras-do-Estado-de-Sao-Paulo-2023.pdf><. Acesso em: 18 junho de 2025.

SÃO PAULO (Estado). COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. Decisão de Diretoria nº 125/2021/E/C, de 07 de dezembro de 2021. São Paulo: CETESB, 2021. Disponível em: ><https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2021/12/DD-125-2021-E-Atualizacao-dos-Valores-Orientadores-paa-solo-e-aguas-subterraneas.pdf><. Acesso em: 18 junho de 2025.

SCHIPPERS, Axel *et al.* *Microbacterium oleivorans* sp. nov. and *Microbacterium hydrocarbonoxydans* sp. nov., novel crude-oil-degrading Gram-positive bacteria. **International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology**, v. 55, n. 2, p. 655–660, 1 mar. 2005.

SÉRVULO, Tobias *et al.* Plastisphere composition in a subtropical estuary: Influence of season, incubation time and polymer type on plastic biofouling. **Environmental Pollution**, v. 332, p. 121873, 2023.

SHARIFAN, Amin. From “No Difference” to “Trending”: misinterpretation of statistical analysis in animal studies. **Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology**, p. 1-4, 2025.

SHARMA, Pooja *et al.* Critical review on microbial community during in-situ bioremediation of heavy metals from industrial wastewater. **Environmental Technology & Innovation**, v. 24, p. 101826, nov. 2021.

SHI, Ke et al. Oil degradation ability difference and microbial community successions by *Ochrobactrum* and *Shewanella* in different oil-polluted seawater. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, n. 5, p. 108392, 2022.

SHIN, Boryoung et al. Succession of microbial populations and nitrogen-fixation associated with the biodegradation of sediment-oil-agglomerates buried in a Florida sandy beach. **Scientific reports**, v. 9, n. 1, p. 19401, 2019.

SILVA, Débora Caribé Passos *et al.* Derramamento de óleo no mar e implicações tóxicas da exposição aos compostos químicos do petróleo. **Revista Contexto & Saúde**, v. 21, n. 44, p. 332–344, 29 dez. 2021.

SILVA, Monteiro, João Paulo et al. Exploring Novel Fungal–Bacterial Consortia for Enhanced Petroleum Hydrocarbon Degradation. **Toxics**, v. 12, n. 12, p. 913, 2024

SIMON, Monika; JOSHI, Himanshu. A review on green technologies for the rejuvenation of polluted surface water bodies: Field-scale feasibility, challenges, and future perspectives. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 4, p. 105763, ago. 2021.

SIPILÄ, Timo P. *et al.* *Sphingobium* sp. HV3 degrades both herbicides and polyaromatic hydrocarbons using ortho-and meta-pathways with differential expression shown by RT-PCR. **Biodegradation**, v. 21, n. 5, p. 771–784, 2010.

SIVKOV, Yuriy; NIKIFOROV, Artur. Study of Oil-Contaminated Soils Phytotoxicity During Bioremediation Activities. **Journal of Ecological Engineering**, v. 22, n. 3, p. 67–72, 1 mar. 2021.

SOUZA, Ellen Cristina; VESSONI-PENNA, Thereza Christina; DE SOUZA OLIVEIRA, Ricardo Pinheiro. Biosurfactant-enhanced hydrocarbon bioremediation: An overview. **International biodeterioration & biodegradation**, v. 89, p. 88–94, 2014.

STEINBACH, Ronja M. et al. *Malassezia* is widespread and has undescribed diversity in the marine environment. **Fungal Ecology**, v. 65, p. 101273, 2023.

STELIGA, Teresa; JAKUBOWICZ, Piotr; KAPUSTA, Piotr. Changes in toxicity during in situ bioremediation of weathered drill wastes contaminated with petroleum hydrocarbons. **Bioresource Technology**, v. 125, p. 1–10, dez. 2012.

STEPANOVA, Anna Yurievna *et al.* Bioremediation of Soil from Petroleum Contamination. **Processes**, v. 10, n. 6, p. 1224, 20 jun. 2022.

SUJA, Fatihah et al. Effects of local microbial bioaugmentation and biostimulation on the bioremediation of total petroleum hydrocarbons (TPH) in crude oil contaminated soil based on laboratory and field observations. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 90, p. 115–122, 2014.

SUN, Yanyu *et al.* Nutrient depletion is the main limiting factor in the crude oil bioaugmentation process. **Journal of Environmental Sciences**, v. 100, p. 317–327, fev. 2021.

TAHHAN, Ragheb A. *et al.* Enhancing the biodegradation of total petroleum hydrocarbons in oily sludge by a modified bioaugmentation strategy. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 65, n. 1, p. 130–134, jan. 2011.

TAYYEB, Sayyid Rasool *et al.* Assessment of biostimulation and bioaugmentation on crude oil-polluted sediments microbial community of Persian Gulf: A microcosm simulation study. **Geomicrobiology Journal**, v. 41, n. 1, p. 98-108, 2024.

TEDESCO, Pietro *et al.* Bioremediation for the recovery of oil polluted marine environment, opportunities and challenges approaching the Blue Growth. **Marine Pollution Bulletin**, v. 200, p. 116157, 2024.

TESFAYE, Eshet Lakew; BOGALE, Fekadu Mazengiaw; ARAGAW, Tadele Assefa. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons: the role of ligninolytic enzymes and advances of biosensors for in-situ monitoring. **Emerging Contaminants**, v. 11, n. 1, p. 100424, 2025.

THACHARODI, Aswin *et al.* Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons: An updated microbiological review. **Chemosphere**, v. 328, p. 138498, jul. 2023.

THOMAS, Gareth E. *et al.* Effects of dispersants and biosurfactants on crude-oil biodegradation and bacterial community succession. **Microorganisms**, v. 9, n. 6, p. 1200, 2021.

THOMAS, José Eduardo. **Fundamentos de engenharia do petróleo**. [S.l.]: Interciência: PETROBRAS, 2001.

TOMASINO, Maria Paola *et al.* Diversity and hydrocarbon-degrading potential of deep-sea microbial community from the Mid-Atlantic Ridge, south of the Azores (North Atlantic Ocean). **Microorganisms**, v. 9, n. 11, p. 2389, 2021.

TRIPATHI, Varsha *et al.* Unlocking bioremediation potential for site restoration: A comprehensive approach for crude oil degradation in agricultural soil and phytotoxicity assessment. **Journal of Environmental Management**, v. 355, p. 120508, mar. 2024.

TYAGI, Meenu; DA FONSECA, M. Manuela R.; DE CARVALHO, Carla C. C. R. Bioaugmentation and biostimulation strategies to improve the effectiveness of bioremediation processes. **Biodegradation**, v. 22, n. 2, p. 231–241, 3 abr. 2011.

URIBE-FLORES, Ma Magdalena *et al.* Bacterial succession and co-occurrence patterns of an enriched marine microbial community during light crude oil degradation in a batch reactor. **Journal of Applied Microbiology**, v. 127, n. 2, p. 495-507, 2019.

US EPA Method 8270D: Semivolatile Organic Compounds by Gas Chromatography/Mass Spectroscopy, Part of Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods.

VAN METER, Robin J.; SPOTILA, James R.; AVERY, Harold W. Polycyclic aromatic hydrocarbons affect survival and development of common snapping turtle (*Chelydra serpentina*) embryos and hatchlings. **Environmental Pollution**, v. 142, n. 3, p. 466-475, 2006.

VARJANI, Sunita J. Microbial degradation of petroleum hydrocarbons. **Bioresource Technology**, v. 223, p. 277–286, jan. 2017.

VARJANI, Sunita; UPASANI, Vivek N.; PANDEY, Ashok. Bioremediation of oily sludge polluted soil employing a novel strain of *Pseudomonas aeruginosa* and phytotoxicity of petroleum hydrocarbons for seed germination. **Science of The Total Environment**, v. 737, p. 139766, out. 2020.

VERMA, Jay P.; JAISWAL, Durgesh K. Book Review: Advances in Biodegradation and Bioremediation of Industrial Waste. **Frontiers in Microbiology**, v. 6, 11 jan. 2016.

VIDAL-VERDÚ, Àngela *et al.* The car tank lid bacteriome: a reservoir of bacteria with potential in bioremediation of fuel. **npj Biofilms and Microbiomes**, v. 8, n. 1, p. 32, 2022. 7

VIEIRA, Gabriela A. L. *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons degradation by marine-derived basidiomycetes: optimization of the degradation process. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 49, n. 4, p. 749–756, out. 2018.

WALKER, Colin Harold; SIBLY, R. M.; PEAKALL, David B. **Principles of ecotoxicology**. CRC press, 2005.

WALKER, John D.; JR, Louis Cofone; COONEY, Joseph J. Microbial petroleum degradation: the role of *Cladosporium resinae*. In: **International Oil Spill Conference**. American Petroleum Institute, 1973. p. 821-825.

WANG, Junfei *et al.* The genus *Paraconiothyrium*: species concepts, biological functions, and secondary metabolites. **Critical Reviews in Microbiology**, v. 47, n. 6, p. 781-810, 2021.

WANG, Min *et al.* Bacterial community response to petroleum contamination in brackish tidal marsh sediments in the Yangtze River Estuary, China. **Journal of Environmental Sciences**, v. 99, p. 160–167, jan. 2021.

WANG, M. *et al.* Soil microbiome structure and function in ecopiles used to remediate petroleum-contaminated soil. **Frontiers in Environmental Science**, v. 9, p. 624070, 2021.

WANG, Wanpeng *et al.* The oxidation of hydrocarbons by diverse heterotrophic and mixotrophic bacteria that inhabit deep-sea hydrothermal ecosystems. **The ISME journal**, v. 14, n. 8, p. 1994-2006, 2020.

WHITE, Thomas J. *et al.* Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. **PCR protocols: a guide to methods and applications**, v. 18, n. 1, p. 315-322, 1990.

WITTE, Claus-Peter. Urea metabolism in plants. **Plant Science**, v. 180, n. 3, p. 431–438, mar. 2011.

WU, Lin *et al.* Lignin-enhanced fungal-bacterial consortium for degradation of petroleum hydrocarbon contaminants. **Journal of Environmental Management**, v. 388, p. 125973, 2025.

WU, Manli et al. Bioaugmentation and biostimulation of hydrocarbon degradation and the microbial community in a petroleum-contaminated soil. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 107, p. 158-164, 2016.

WU, Manli et al. Effect of bioaugmentation and biostimulation on hydrocarbon degradation and microbial community composition in petroleum-contaminated loessal soil. **Chemosphere**, v. 237, p. 124456, 2019.

WU, Yonghong; LI, Tianling; YANG, Linzhang. Mechanisms of removing pollutants from aqueous solutions by microorganisms and their aggregates: A review. **Bioresource Technology**, v. 107, p. 10–18, mar. 2012.

XUE, Jianliang et al. Marine oil-degrading microorganisms and biodegradation process of petroleum hydrocarbon in marine environments: a review. **Current microbiology**, v. 71, n. 2, p. 220-228, 2015.

XUE, Yubin et al. Arsenic bioremediation in mining wastewater by controllable genetically modified bacteria with biochar. **Environmental Technology & Innovation**, v. 33, p. 103514, 2024.

XU, Qicheng et al. Microbial generalists and specialists differently contribute to the community diversity in farmland soils. **Journal of Advanced Research**, v. 40, p. 17-27, 2022.

XU, Nana *et al.* Study on bioadsorption and biodegradation of petroleum hydrocarbons by a microbial consortium. **Bioresource Technology**, v. 149, p. 22–30, dez. 2013.

XU, Ran; OBBARD, Jeffrey P. Effect of Nutrient Amendments on Indigenous Hydrocarbon Biodegradation in Oil-Contaminated Beach Sediments. **Journal of Environmental Quality**, v. 32, n. 4, p. 1234–1243, jul. 2003.

XU, Tangchang et al. Secondary metabolites of the genus *Nigrospora* from terrestrial and marine habitats: Chemical diversity and biological activity. **Fitoterapia**, v. 161, p. 105254, 2022.

XU, Xingjian *et al.* Petroleum Hydrocarbon-Degrading Bacteria for the Remediation of Oil Pollution Under Aerobic Conditions: A Perspective Analysis. **Frontiers in Microbiology**, v. 9, 3 dez. 2018.

YAKIMOV, Michail M.; TIMMIS, Kenneth N.; GOLYSHIN, Peter N. Obligate oil-degrading marine bacteria. **Current opinion in biotechnology**, v. 18, n. 3, p. 257-266, 2007.

YAN, Xiao *et al.* Comparing Different Strategies for Cr(VI) Bioremediation: Bioaugmentation, Biostimulation, and Bioenhancement. **Sustainability**, v. 15, n. 16, p. 12522, 17 ago. 2023.

YERGEAU, Etienne *et al.* Microarray and Real-Time PCR Analyses of the Responses of High-Arctic Soil Bacteria to Hydrocarbon Pollution and Bioremediation Treatments. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 75, n. 19, p. 6258–6267, out. 2009.

YUAN, Xiaoyu *et al.* Synergistic degradation of crude oil by indigenous bacterial consortium and exogenous fungus *Scedosporium boydii*. **Bioresource technology**, v. 264, p. 190-197, 2018.

ZADJELOVIC, Vinko *et al.* Beyond oil degradation: enzymatic potential of *Alcanivorax* to degrade natural and synthetic polyesters. **Environmental Microbiology**, v. 22, n. 4, p. 1356–1369, 27 abr. 2020.

ZAMAN, Syed Arshi Uz *et al.* Isolation and characterization of novel hydrocarbon-degrading bacteria from oil polluted soil near Nacharam, Hyderabad, India. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 17219, 2025.

ZELINKOVA, Zuzana; WENZL, Thomas. The occurrence of 16 EPA PAHs in food—a review. **Polycyclic aromatic compounds**, v. 35, n. 2-4, p. 248-284, 2015.

ZHANG, Lige *et al.* Unveiling degradation mechanism of PAHs by a *Sphingobium* strain from a microbial consortium. **mLife**, v. 1, n. 3, p. 287–302, 25 set. 2022.

ZHANG, Xiaoxue *et al.* Ligninolytic enzyme involved in removal of high molecular weight polycyclic aromatic hydrocarbons by *Fusarium* strain ZH-H2. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 34, p. 42969-42978, 2020.

ZHAO, Baisuo *et al.* Biodegradation of phenanthrene by a halophilic bacterial consortium under aerobic conditions. **Current microbiology**, v. 58, n. 3, p. 205-210, 2009.

ZHAO, Yi-He *et al.* Characterization and application of a novel bioemulsifier in crude oil degradation by *Acinetobacter beijerinckii* ZRS. **Journal of Basic Microbiology**, v. 56, n. 2, p. 184–195, 18 fev. 2016.

ZHOU, Dan-dan *et al.* *Tropicibacter oceani* sp. nov., a novel sulfur-metabolizing bacteria isolated from the intertidal zone sediment of Chinese Yellow Sea. **Antonie van Leeuwenhoek**, v. 116, n. 12, p. 1337-1344, 2023.

ZHOU, Hanghai *et al.* Enhanced remediation of oil-contaminated intertidal sediment by bacterial consortium of petroleum degraders and biosurfactant producers. **Chemosphere**, v. 330, p. 138763, 2023.