



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA
DEPARTAMENTO DE SISTEMÁTICA E ECOLOGIA
CURSO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

**POTENCIAL DE MICRORGANISMOS ASSOCIADOS AO MAXIXE-DO-
NORTE (*CUCUMIS ANGURIA*) NA BIORREMEDIAÇÃO DE SOLO
CONTAMINADO COM ÓLEO LUBRIFICANTE**

João Pessoa

2025

ÁDRIA ANACLETO PEREIRA MENDES

Trabalho Acadêmico de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Ciências Biológicas, como
requisito parcial à obtenção do grau de Bacharelado
em Ciências Biológicas da Universidade Federal da
Paraíba.

Orientadora: Maria Cristina Basilio Crispim da
Silva

Co- orientador: Ulrich Vasconcelos da Rocha
Gomes

João Pessoa

2025

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

M538p Mendes, Adria Anacleto Pereira.

Potencial de microrganismos associados ao Maxixe-do-norte (Cucumis anguria) na biorremediação de solo contaminado com óleo lubrificante / Adria Anacleto Pereira Mendes. - João Pessoa, 2025.

50 p. : il.

Orientação: Maria Cristina Basilio Crispim da Silva.

Coorientação: Ulrich Vasconcelos da Rocha Gomes.

TCC (Curso de Bacharelado em Ciências Biológicas)

UFPB/CCEN.

1. Cucurbitáceas. 2. Endófitos bacterianos. 3.

Hidrocarbonetos do petróleo. I. Silva, Maria Cristina Basilio Crispim da. II. Gomes, Ulrich Vasconcelos da Rocha. III. Título.

UFPB/CCEN

CDU 57(043.2)

ÁDRIA ANACLETO PEREIRA MENDES

**POTENCIAL DE MICRORGANISMOS ASSOCIADOS AO MAXIXE-
DONORTE (CUCUMIS ANGURIA) NA BIORREMEDIAÇÃO DE SOLO
CONTAMINADO COM ÓLEO LUBRIFICANTE**

Trabalho Acadêmico de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Ciências Biológicas, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharelado em Ciências Biológicas da Universidade Federal da Paraíba.

DEFESA REALIZADA EM: 06/10/2025

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 **MARIA CRISTINA BASILIO CRISPIM DA SILVA**
Data: 16/10/2025 09:31:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Maria Cristina Basilio Crispim Da Silva, Doutora, UFPB

Documento assinado digitalmente
 **KAIQUE YAGO GERVAZIO DE LIMA**
Data: 23/10/2025 16:54:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Kaíque Yago Gervazio de Lima, Mestre, UFPB

Documento assinado digitalmente
 **ULRICH VASCONCELOS DA ROCHA GOMES**
Data: 19/10/2025 17:35:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ulrich Vasconcelos Da Rocha Gomes, Doutor, UFPB

Dedico à minha querida família e meu amor, parceiro de todas as horas, Ian

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus.

Agradeço a minha família, que me deu todo apoio durante esse processo, suas orações me ajudaram durante todo o caminho. Pai, mãe, avô, avó, Paulinha e Melkinho, amo vocês, obrigado a todos. Agradeço em especial ao amor da minha vida, meu melhor amigo, Ian, que me ajudou todos os dias da graduação, foi meu professor, corretor, editor e apoio nos momentos de surto.

Ao melhor orientador do mundo, Ulrich Vasconcelos, por toda confiança, todo conhecimento passado e, pela oportunidade de estar nesse laboratório que se tornou minha segunda casa, o LAMA. Deixo também minha gratidão aos meus colegas de laboratório, por me emprestarem minha caneta e por todo apoio durante o caminho, o trabalho é mais divertido com vocês Kaíque, Vini, Gabriel Ivo, Hueliton, Roosevelt e Juliana.

Aos amigos antigos e novos. Emily, obrigado por me dizer para tentar biologia, a todos os iludidos que estiveram me ouvindo reclamar: Paulo, Gabriel, Enzo, Iza, deixo meu carinho moderado. Laís, pelo apoio moral e pelos momentos de desabafo.

Aos professores, antigos e novos. Prof. Solano Alves, Prof. Alex Menezes, Prof.^a Cristina Crispim, Prof.^a Cristine Hirsch e Prof. Arthur, obrigado por todo conhecimento.

Agradeço a UFPB, ao Centro de Biotecnologia pelo acolhimento e pelo apoio.

A todos que não foram citados....melhorem que ainda tem mestrado, obrigado.

RESUMO

A contaminação causada por óleo lubrificante usado representa um grave problema para a saúde humana e ambiental, pois são compostos tóxicos, persistentes e altamente poluentes. Nesse cenário, surge a biorremediação como estratégia barata e simples, que busca atenuar os impactos ambientais dos poluentes. Este estudo buscou e identificar bactérias endofíticas associadas a *Cucumis anguria* cultivado em solo contaminado com uma mistura de óleo lubrificante usado, bem como avaliar seu potencial biodegradador. Foram encontradas 18 espécies de bactérias, Gram-positivas: *Bacillus cereus/thurigiensis III*, *Bacillus cereus/thurigiensis IV*, *Bacillus mycoides*, *Micrococcus luteus*, *Priestia flex*, *Lysinibacillus fusiformis*, *Bacillus pumilus*, *Paenibacillus apiarus*, *Bacillus subtilis*, *Staphylococcus saprophyticus* e *Brevibacterium casei* e Gram-negativas: *Enterobacter hormaechei*, *Acinetobacter radioresistens*, *Pseudomonas mendocina*, *Pseudomonas stutzeri*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Moraxella osloensis* e *Enterobacter cloacae*. Ensaio com óleo lubrificante indicaram capacidade de emulsificação e de utilização de hidrocarbonetos como única fonte de carbono, além, da resistência de *C. anguria* ao ambiente contaminado. Os resultados obtidos indicam que os endófitos associados a *C. anguria* apresentam potencial promissor para aplicação na biorremediação de ambientes impactados por petróleo e seus derivados, configurando-se como uma alternativa viável para o tratamento de solos contaminados por esses poluentes.

Palavras-chave: Cucurbitáceas, Endófitos bacterianos; Hidrocarbonetos do petróleo.

ABSTRACT

Contamination caused by used lubricating oil represents a serious problem for human and environmental health, as these compounds are toxic, persistent, and highly polluting. In this context, bioremediation emerges as a simple and low-cost strategy aimed at mitigating the environmental impacts of pollutants. This study sought to identify endophytic bacteria associated with *Cucumis anguria* cultivated in soil contaminated with a mixture of used lubricating oil, as well as to evaluate their biodegradation potential. A total of 18 bacterial species were found, Gram-positive: *Bacillus cereus/thurigiensis* III, *Bacillus cereus/thurigiensis* IV, *Bacillus mycoides*, *Micrococcus luteus*, *Priestia flex*, *Lysinibacillus fusiformis*, *Bacillus pumilus*, *Paenibacillus apiarius*, *Bacillus subtilis*, *Staphylococcus saprophyticus*, and *Brevibacterium casei* and Gram-negative: *Enterobacter hormaechei*, *Acinetobacter radioresistens*, *Pseudomonas mendocina*, *Pseudomonas stutzeri*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Moraxella osloensis*, and *Enterobacter cloacae*. Assays with lubricating oil indicated emulsification capacity and the ability to utilize hydrocarbons as the sole carbon source, in addition to the resistance of *C. anguria* to the contaminated environment. The results indicate that the endophytes associated with *C. anguria* show promising potential for application in the bioremediation of environments impacted by petroleum and its derivatives, representing a viable alternative for the treatment of soils contaminated by these pollutants.

Keywords: Cucurbits; Bacterial endophytes; Petroleum hydrocarbons.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

OLUC - Óleo lubrificante usado ou contaminado

CRA - Capacidade de retenção de água

PHC - hidrocarbonetos de petróleo

HPA - Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos

TPH - Hidrocarbonetos Totais de Petróleo.

E₂₄ - Índice de emulsificação de 24h

MALDI-TOF - *Matrix-Assisted Laser Desorption/Ionization Time-of-Flight*

BHI - *Brain-Heart infusion*

DCF - Departamento de Ciências Farmacêuticas

AN - Ágar nutriente

NMP - Número mais provável

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aspecto de *C. anguria* como uma planta rasteira.

Figura 2 – Aspecto de *C. anguria* após 14 dias do plantio

Figura 3 – Amostras de *C. anguria* em cada tratamento utilizadas nos experimentos

Figura 4 – Microgotas de A1/A2/A3: *Bacillus cereus*; A4/A5/A6: *Bacillus cereus*; A7/A8/A9: *Bacillus mycoides*; A9: *Bacillus mycoides*; A10/A11/A12: *Micrococcus luteus*; - B1/B2/B3: *Enterobacter hormaechei*; B4: *Priestia flex*;

Figuras 5 – B5/B6: *Priestia flex*; B7B8/B9: *Acinetobacter radioresistens*; B10/B11/B12: *Pseudomonas mendocina*;

Figura 6 – C1/C2/C3: *Lysinibacillus fusiformis*; C4/C5/C6: *Pseudomonas stutzeri*; C7/C8 *Bacillus pumilus*;

Figura 7 – C9: *Bacillus pumilus*; C10/C11/C12: *Paenibacillus apiarius*; D1/D2/D3: *Pseudomonas aeruginosa*; D4: *Moraxella osloensis*;

Figura 8 – D5/D6: *Moraxella osloensis*; D7/D8/D9: *Brevibacterium casei*; D10/D11/D12: *Staphylococcus saprophyticus*

Figura 9 – E1: E2: /E3: *Enterobacter cloacae*; E4/E5/E6: ESPCA3; E7/E8: ESPCA4

Figura 10 – E9:ESPCA4; E10/E11/E12:ESPCA13; F1/F2/F3: *Bacillus cereus*. F4: ESPCA21

Figura 11 – F5/F6: ESPCA21; F7/F8/F9:ESPFA10; F10/F11/F12:ESPCB3

Figura 12 – G1/G2/G3: ESPCB6; G4/G5/G6:ESPFB1; G7/G8:ESPFB3

Figura 13 – G9:ESPFB3; G10/G11/G12:ESPFB4; H1/H2/H3: *Lysinibacillus fusiformis*; H4: ESPFC2

Figura 14 – /H5/H6:ESPBFC2 H7/H8/H9: *Bacillus subtilis*; H10/H11/H12: *Enterobacter hormaechae*;

Figura 15 – A--1/A--2/A--3: ESPFC6; A--4/A--5/A--6: ESPCC4X; A--7/A—8: ESPCD2

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
2.1 ÓLEO LUBRIFICANTE USADO	2
2.2 BIORREMEDIAÇÃO.....	3
2.3 BACTÉRIAS ENDOFÍTICAS EM BIORREMEDIAÇÃO.....	6
2.4 <i>Cucumis anguria</i> (Maxixe-do-norte)	8
3. OBJETIVOS	
3.1 Objetivo Geral.....	10
3.2 Objetivos Específicos.....	10
4. METODOLOGIA.....	10
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	16
6. CONCLUSÃO	
REFERÊNCIAS	

1. INTRODUÇÃO

O petróleo é uma mistura complexa de hidrocarbonetos, compostos orgânicos formados apenas por hidrogênio e carbono, além de outros átomos, como oxigênio, nitrogênio e metais (Daâssi e Qabil, 2022). No Brasil, a produção em dezembro de 2024 atingiu 3,421 milhões de barris de petróleo bruto ao dia (Brasil, 2025).

Dentre os produtos derivados do refino do petróleo, destaca-se o óleo lubrificante (Benguenab e Chibani, 2021). Esse derivado tem como principal função reduzir o atrito entre partes móveis de motores e máquinas, garantindo maior eficiência e durabilidade (Ekanem e Ogunjobi, 2017). Contudo, após o uso, o óleo lubrificante sofre alterações físicas e químicas decorrentes da exposição a altas temperaturas, oxidação, contaminação com metais pesados e subprodutos da combustão e, torna-se um resíduo altamente poluente, conhecido como óleo lubrificante usado e contaminado, OLUC, ou apenas óleo queimado (Almeida, 2023).

A biorremediação é uma técnica que utiliza microrganismos para degradar, transformar ou tornar menos tóxicas substâncias químicas poluentes presentes no ambiente (Afzal *et al.*, 2014). Nesse contexto, a associação das plantas com microrganismos, como endófitos, surge como alternativa para superar limitações da fitorremediação isolada, destacando-se pela capacidade de degradar compostos orgânicos recalcitrantes de forma mais sustentável e acessível, quando comparada a métodos físico-químicos tradicionais (Durand *et al.*, 2021).

Cucumis anguria, ou maxixe-do-norte, é uma Cucurbitaceae de origem africana cultivada em diversas regiões, incluindo o nordeste brasileiro, onde foi inserida na cultura gastronômica regional (Murthy *et al.*, 2022; Brochado *et al.*, 2025). Na literatura, não foram encontrados trabalhos direcionados ao isolamento de endófitos do maxixe-do-norte.

Diante disso, este estudo busca analisar os endófitos associados ao maxixe-do-norte (*C. anguria*), quando cultivado em solo contaminado com óleo de motor, apresentam diversidade microbiana e incluem linhagens com potencial para degradar hidrocarbonetos. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo analisar a composição endofítica do maxixe-do-norte cultivado em solo contaminado com óleo de motor, investigando a diversidade bacteriana dos endófitos. Além disso, buscou-se isolar, cultivar e caracterizar os microrganismos endofíticos associados à planta e avaliar sua capacidade de biodegradação do óleo. Esse estudo pretende contribuir para o

desenvolvimento de abordagens biotecnológicas de remediação ambiental, promovendo o uso sustentável da microbiota autóctone em solos degradados.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 ÓLEO LUBRIFICANTE USADO

Após o refino do petróleo bruto, obtêm-se diversos derivados com ampla aplicação, entre os quais se destacam gasolina, diesel, querosene de aviação e óleo lubrificante, além de matérias-primas essenciais para a indústria química e de infraestrutura (Brasil, 2025). A crescente demanda por esses produtos tem impulsionado, de forma simultânea, o aumento da produção, do refino e da distribuição do petróleo e seus derivados (Iqbal *et al.*, 2019). Contudo, o manejo e o descarte inadequado desses recursos resultam no despejo de grandes quantidades de resíduos tóxicos e compostos orgânicos recalcitrantes, que representam sério risco ambiental (Benguenab e Chibani, 2021).

O óleo lubrificante, em específico, é composto por óleos básicos associados a aditivos, apresentando inicialmente uma mistura complexa de hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos, como parafinas e naftenos, além de substâncias que potencializam suas propriedades (Nowark *et al.*, 2019). O OLUC, ou seja, o óleo lubrificante usado ou contaminado, contém compostos de elevada toxicidade, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA), tais como naftaleno, benzo[a]pireno, benzo[a]antraceno e fluoranteno, reconhecidos pelo seu potencial carcinogênico e mutagênico (Wongsa *et al.*, 2004; Ryan *et al.*, 2008; 2017; Bolaji *et al.*, 2020; Ishaya *et al.*, 2023; Zhong *et al.*, 2024; Taleshpur, 2025).

O Brasil possui uma das maiores frotas de veículos do mundo e, conseqüentemente, destaca-se também entre os maiores consumidores de lubrificantes automotivos. Nesse cenário, as atividades ligadas ao setor de manutenção e reparo de veículos, como as realizadas em oficinas mecânicas, têm grande relevância. Entre elas, sobressai a troca do óleo do motor, que representa uma das principais formas de utilização dos óleos lubrificantes no país (Brasil, 2025; Diógenes, 2025).

Segundo dados de 2024 da Agência Nacional de Petróleo (ANP), no ano de 2023, 1.494.709,47 m³ de óleo lubrificante foram comercializados e 567.431,00 m³ de OLUC foram coletados (Brasil, 2024). Entretanto, uma parcela significativa desse resíduo não é recolhida adequadamente, sendo muitas vezes destinada ao meio ambiente. Tal descarte

incorreto gera impactos ambientais severos, já que apenas 1 litro de OLUC pode contaminar até 1 milhão de litros de água (Santos e Júnior, 2025).

Óleos lubrificantes usados contêm metais pesados, por exemplo, cromo, cádmio, arsênio e chumbo. Outras moléculas podem estar presentes, tais como HPAs, benzeno, solventes clorados, bifenil policlorados, além de aditivos e ácidos orgânicos (Ajjam, 2025). Esses compostos são reconhecidos por sua persistência ambiental e toxicidade significativa (Sánchez-Alvarracín *et al.*, 2021). Além disso, podem acumular na cadeia trófica e possuem elevada mobilidade pelas mais diversas vias, como solo, água e ar (Islam *et al.*, 2024), constituindo um grave risco à saúde (Tamada *et al.*, 2012). Estima-se que cerca de 2% do petróleo consumido mundialmente seja destinado à produção de óleos lubrificantes (Vieira *et al.*, 2024). No Brasil, a produção de petróleo bruto atingiu aproximadamente 3,421 milhões de barris por dia em dezembro de 2024 (Brasil, 2025), evidenciando a importância desse recurso e de seus derivados tanto sob o aspecto econômico quanto ambiental (Kojuri e Ardestani, 2018).

2.2 BIORREMEDIAÇÃO

Os métodos tradicionais mais comuns de remoção de hidrocarbonetos do petróleo de matrizes sólidas como a areia, são, por exemplo a dessorção térmica, extração com solvente e oxidação (Daâssi e Qabil, 2022; Dhaka e Chattopadhyay, 2021). No entanto, cada uma dessas metodologias apresenta limitações especialmente por serem onerosas e apresentarem risco de causar impactos ambientais secundários (Afzal *et al.*, 2014). Nesse contexto, a remediação com agentes biológicos surge como uma alternativa eficaz e economicamente viável (Fatima *et al.* 2018; Matilda e Samuel, 2024).

A biorremediação é um processo, que se inicia com o delineamento da problemática, ou seja, o diagnóstico, seguido pela escolha e aplicação da estratégia adequada e, conclui-se com a avaliação da degradação dos contaminantes na região alvo (Haripriyan *et al.*, 2022). Configura-se como uma intervenção cujo objetivo é aumentar a taxa de degradação, convertendo os contaminantes em metabólitos intermediários ou os mineralizando, reduzindo com isso a exposição do ambiente aos efeitos danosos dessas moléculas (Mekonnen *et al.*, 2024).

A biorremediação apresenta diversas vantagens, como a promoção da saúde ecossistêmica, diminuição dos riscos à saúde, baixo custo e simplicidade (Umar *et al.*, 2013; Ajjam, 2025). Além disso, engloba diferentes técnicas *in situ* e *ex situ*. Dentre as técnicas que a integram pode-se citar: bioaumento, bioestimulação, *landfarming*,

bioventilação, fitorremediação e eletrobiorremediação (Santos *et al.*, 2021), compostagem e o uso de biorreatores (Jacques *et al.*, 2007). Entre essas abordagens, destaca-se a fitorremediação, metodologia que utiliza plantas com capacidade de remover, degradar ou estabilizar contaminantes, sendo amplamente reconhecida por sua eficiência e aplicabilidade em diferentes ambientes contaminados (Karás *et al.*, 2021).

As plantas desenvolveram, ao longo da evolução, mecanismos enzimáticos complexos capazes de respirar, catabolizar, desintoxicar e produzir metabólitos secundários, o que lhes confere potencial significativo para a degradação de substâncias orgânicas tóxicas e poluentes (Afzal *et al.*, 2014).

Cada abordagem de remediação apresenta desafios específicos. No caso da utilização de plantas, embora possam atuar na degradação de xenobióticos (Durand *et al.*, 2021), isto é, substâncias orgânicas ou inorgânicas, altamente persistentes, potencialmente acumulativas em tecidos animais, vegetais e no ambiente (Datta *et al.*, 2025), a eficiência da fitorremediação é frequentemente limitada por fatores como a capacidade de acumulação, baixa biodisponibilidade dos contaminantes e sensibilidade a altas concentrações do poluente, ou até mesmo da incompatibilidade do poluente com o metabolismo da planta (Simmer e Schnoor, 2022).

Dentre os desafios associados à biorremediação estão a velocidade de remoção do contaminante, relativamente baixa quando comparada a técnicas tradicionais de remediação química, assim como o risco inerente da introdução de novos microrganismos, alóctones, autóctones e/ou geneticamente modificados, que podem representar risco ao equilíbrio do sítio em tratamento (Mekonnen *et al.*, 2024). Soma-se a isso a dependência de condições ambientais como solo, pH, temperatura e concentração de contaminantes. Outro aspecto é a possível degradação incompleta dos hidrocarbonetos do petróleo diz respeito à introdução de substâncias nocivas no ambiente (Simmer e Schnoor, 2022). Nesse contexto, estudos aprofundados e a integração de técnicas e tecnologias emergentes da química, biologia sintética e engenharia, oferecem oportunidades para melhorar linhagens e intensificar a eficiência de degradação (Yan *et al.*, 2025).

Adicionalmente, poluentes presentes no solo podem comprometer o desenvolvimento das plantas, mesmo em espécies tolerantes, reduzindo a eficácia do processo de remediação. Além disso, a fitorremediação isolada é ineficiente para remoção de substâncias pela dificuldade ou incapacidade das plantas de degradarem compostos orgânicos complexos (Lima *et al.*, 2020).

A associação das plantas com microrganismos, tanto rizosféricos como endofíticos, surge como alternativa para superar essas limitações. Estima-se que as plantas constituam o reino dominante em biomassa na Terra, seguidas pelas bactérias, além de fornecerem importantes serviços ecossistêmicos, como o sequestro de carbono e a liberação de oxigênio, abrigam diversos microrganismos, como fungos e bactérias, formando um ecossistema rico e complexo tanto interna quanto externamente (Barão, Phillips & Milo, 2018; Chlebek e Hupert-kocurek, 2019).

Nesse cenário, destaca-se a fitorremediação associada a microrganismos, essa estratégia apresenta potencial de degradar compostos orgânicos recalcitrantes de forma mais sustentável, quando comparada a métodos físico-químicos (Durand *et al.*, 2021). Essa interação promove uma relação sinérgica em que os microrganismos degradadores reduzem a fitotoxicidade, transformam hidrocarbonetos em metabólitos menos tóxicos e favorecem o crescimento vegetal (Yousaf *et al.*, 2011; Afzal *et al.*, 2014).

Além disso, os microrganismos que ocorrem nos tecidos vegetais podem promover mecanismos de defesa contra patógenos, insetos e nematódeos (Iqbal *et al.*, 2019). Alguns são capazes de liberar substâncias que promovem a emergência de mudas mais rapidamente e contribuem para a resistência das plantas em ambientes contaminados (Compant *et al.*, 2010).

Espécies bacterianas associadas à rizosfera, ambiente em contato com as raízes (Sampaio, 2015), podem produzir fitormônios como ácido indolacético (AIA), giberelinas e citocininas, que estimulam o crescimento radicular, aumentando a absorção de nutrientes e água. Outras bactérias possuem a capacidade de produzir ACC desaminase, enzima que reduz os níveis de etileno, que por sua vez é um hormônio vegetal que se acumula sob condições de estresse e inibe o crescimento. O que, por sua vez, permite maior tolerância das plantas a ambientes contaminados (Pawlik, *et al.* 2017).

Em contrapartida, as plantas fornecem exsudatos e metabólitos secundários que servem de fonte de carbono e energia para a microbiota associada, estimulando sua atividade e diversidade. Essa cooperação mutualística intensifica a degradação de compostos, como os hidrocarbonetos, incluindo a produção de biossurfactantes microbianos que aumentam a solubilização e a biodisponibilidade dos contaminantes porque tais compostos reduzem a tensão superficial entre o óleo e a água (Ryan *et al.*, 2008, Lopes, 2014).

Os biossurfactantes, produzidos por microrganismos como fungos e bactérias, destacam-se como alternativas sustentáveis aos surfactantes sintéticos devido à baixa

do caráter anfílico, que aumenta a biodisponibilização de contaminantes hidrofóbicos, favorecendo processos de Biodegradação (Jacob *et al.*, 2022). A identificação pode envolver testes de redução da tensão superficial e do potencial emulsificante, como índice de emulsificação (E_{24}) e o teste de deslocamento de óleo, sendo considerados satisfatórios valores de emulsificação acima de 50%, quando estáveis em diferentes condições ambientais (Biktasheva *et al.*, 2024). Apesar do potencial, limitações como alto custo de produção e métodos de extração ineficientes ainda restringem sua aplicação. Diversos tipos já foram descritos, como glicolipídios e lipopeptídeos, produzidos por gêneros como *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Streptomyces*, *Serratia*, *Actinomyces* e *Enterobacter* (Santos, 2011; Olowomofe *et al.*, 2017; Marchut-Mikolajczyk *et al.*, 2018; Obot *et al.*, 2024).

Assim, a interação entre plantas e microrganismos amplia de forma expressiva o potencial de remediação de áreas impactadas por petróleo e seus derivados, configurando-se como uma estratégia eficiente e sustentável (Nie *et al.*, 2025). Os microrganismos não apenas atuam diretamente na degradação desses compostos, como também fortalecem a resistência e a capacidade adaptativa das plantas (Förnkrantz, *et al.*, 2012; Mushtaq, *et al.*, 2023).

2.3 BACTÉRIAS ENDOFÍTICAS EM BIORREMEDIAÇÃO

As bactérias endofíticas habitam os tecidos vegetais sem causar danos à planta, contribuindo em diferentes mecanismos como a metabolização de substâncias tóxicas, promoção do crescimento vegetal e indução de tolerância a diferentes estresses ambientais (Lumactud *et al.*, 2016; Khalaf e Raizada, 2016). A microbiota endofítica é capaz também de acelerar a emergência e crescimento de plântulas, e pode desempenhar um papel na fertilidade do solo por meio da solubilização de fosfato e fixação de nitrogênio (Mametja *et al.*, 2025).

O termo endófito surgiu no início do século XIX a fim de nomear os microrganismos que colonizam tecidos internos de plantas. Sua entrada nos tecidos vegetais pode ser via estômatos, lenticelas, ferimentos, áreas de emergência de raízes e radículas, sendo os ferimentos e os pelos radiculares as principais portas de entrada (Silva, 2012). Além disso, algumas espécies penetram ativamente nos tecidos vegetais por meio da produção de celulases e pectinases, que degradam a parede celular (Ryan *et al.*, 2008).

Bactérias endofíticas podem estabelecer diferentes tipos de interação com as plantas hospedeiras, incluindo relações simbióticas, mutualísticas, comensais e até

mesmo trofobióticas (Muthusamy *et al.*, 2024). Seu metabolismo pode reduzir a evapotranspiração de poluentes orgânicos voláteis (Taghavi *et al.*, 2005).

Devido a sua localização, no interior dos tecidos vegetais, podem estar mais intimamente relacionadas e interagir de forma mais eficiente com as plantas do que as rizobactérias (Afzal *et al.*, 2014). Microrganismos endofíticos podem ser facilmente isolados após esterilização superficial dos tecidos da planta (Viana, 2016).

Diversas pesquisas demonstraram que bactérias isoladas de plantas são capazes de degradar hidrocarbonetos, especialmente em ambientes contaminados por óleo diesel (Iqbal *et al.*, 2019), óleo lubrificante (Bolaji *et al.*, 2020), octanol, tolueno, naftaleno, querosene (Lumactud *et al.*, 2016), petróleo bruto (Fatima, *et al.* 2018), além de outros derivados e resíduos como metais pesados (Liu, *et al.* 2024) e HPA (Imam *et al.*, 2022). Estudos apontam que endófitos que apresentam genes que atuam na degradação de contaminantes são naturalmente selecionados pelas plantas (Ryan *et al.*, 2008; Kaneez *et al.*, 2018).

Plantas empregadas em processos de fitorremediação podem ser aproveitadas para a produção de biomassa destinada à geração de biocombustíveis e para o sequestro de carbono atmosférico (Durand *et al.*, 2021). Nesse contexto, o uso de bactérias endofíticas como agentes promotores da fitorremediação tem se destacado como uma abordagem inovadora e promissora (Ma *et al.*, 2016).

Alguns exemplos desses vegetais são *Lolium multiflorum*, o azevém-italiano, *Lotus corniculatus*, o cornichão e *Medicago sativa* L., a alfafa. Essas plantas foram testadas com inóculos de *Enterobacter ludwigii* e demonstraram um alto potencial biorremediador, com capacidade não só de colonizar plantas de forma eficaz, mas também de degradar hidrocarbonetos (Yousaf *et al.*, 2011).

Quanto à ação das bactérias endofíticas em relação a retirada de substâncias orgânicas foram propostas três explicações: 1) a promoção do crescimento vegetal e do acúmulo de biomassa; 2) a biodisponibilização dos contaminantes no solo; e 3) estimulação da população e da atividade de microrganismos autóctones por meio da transferência horizontal de genes relacionados com a degradação de compostos tóxicos. Além disso, o aumento da biomassa vegetal pode transferir a massa de poluentes nos tecidos da planta, atenuando os efeitos tóxicos e o estresse fisiológico causado pela exposição aos contaminantes. (Khan *et al.*, 2013; Afzal *et al.*, 2014)

Para que a remoção do contaminante seja efetiva, é necessário que haja colonização dos tecidos, processo dependente das características genéticas e funcionais

de cada microrganismo. Além disso, ambos, bactéria e planta, devem persistir. Contudo, frequentemente inóculos alóctones são superados por isolados autóctones. Isso ocorre porque as comunidades microbianas residentes estão naturalmente adaptadas às condições ambientais locais, como solo, clima, composição química e estresses específicos do ambiente contaminado. Em muitos casos, esses microrganismos não apenas se mantêm, mas também competem de forma mais eficaz por nichos ecológicos e recursos dentro dos tecidos vegetais (Compant *et al.*, 2010).

Dessa forma, estudos que busquem identificar microrganismos nativos de ambientes contaminados podem representar uma estratégia mais eficiente para a biorremediação mediada por endofíticos. Em vez de depender exclusivamente do bioaumento, em complemento, abordagens que utilizam o potencial da microbiota residente apresentam maior estabilidade, integração e eficácia em longo prazo (Ryan *et al.*, 2008; Lumactud *et al.*, 2016).

Uma análise dos endófitos de espécies tolerantes à poluição por hidrocarbonetos de petróleo, *Achillea millefolium*, *Solidago canadensis*, *Trifolium aureum* e *Dactylis glomerata*, demonstrou que mais de 50% dos isolados foram capazes de degradar um ou mais hidrocarbonetos testados. Foi revelado também que havia comunidades endofíticas distintas por planta hospedeira, apesar da forte contaminação ambiental (Lumactud *et al.*, 2016). *Massilia* sp. Pn2 e *Pseudomonas* sp. Ph6, linhagens isoladas de *Alopecurus aequalis* e *Trifolium pratense*, respectivamente, foram capazes de remover fenantreno de *Lolium multiflorum*, reduzindo o teor de contaminante e promovendo crescimento da planta em um ambiente poluído (Karás *et al.*, 2021).

Neste cenário, estudos que busquem bactérias associadas a plantas desenvolvidas em locais impactados por hidrocarbonetos do óleo emergem como uma ferramenta sustentável para enfrentar a poluição por estes compostos.

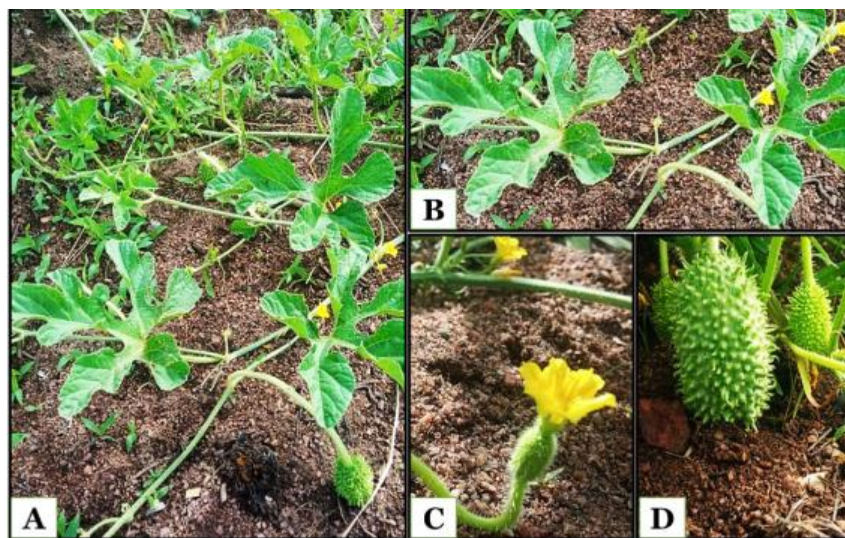
2.4 CUCUMIS ANGURIA (MAXIXE-DO-NORTE)

C. anguria, popularmente conhecido como “maxixe-do-norte”, pertence à família Cucurbitaceae e apresenta crescimento indeterminado e prostrado (Figura 1). Trata-se de uma espécie monóica e anual que, diferentemente do pepino e do melão, também da mesma família, possui folhas lobuladas (Kulandhaivel *et al.*, 2025).

O maxixe é cultivado no Brasil, Cuba, Índia, Estados Unidos e no seu continente de origem, a África. A hortalça produz frutas oblongas cobertas por espinhos moles (Murthy *et al.*, 2022). Foi introduzida em outras regiões e se adaptou particularmente bem

ao nordeste brasileiro onde foi inserida na cultura gastronômica regional. O cultivo do maxixe é predominantemente realizado por meio da agricultura familiar, sendo uma planta de fácil adaptação e crescimento em diversas condições ambientais (Brochado *et al.*, 2025).

Figura 1 – Aspecto de *C. anguria* como uma planta rasteira.



Em A) caule; B) folhas; C) flor; e D) fruto.

Fonte: https://diversitasjournal.com.br/diversitas_journal/article/view/2536.

Acesso em 14 set. 2025

A colheita do maxixe ocorre entre 60 e 70 dias após o semeio (Modolo; Costa, 2003). O fruto é consumido em pratos como moquecas, refogados e saladas. De crescimento rápido, se adapta bem a temperaturas quentes (Brochado *et al.*, 2025). Os frutos são ricos em proteína, ferro, potássio, fósforo, cálcio e vitamina C (Kulandhaivel *et al.* 2025).

O cultivo no Brasil é caracterizado por seus frutos compridos com espiculosidade variada e a maior parte da produção é concentrada na região Nordeste. O consumo no Norte e Nordeste é de 0,172 e 0,130 kg/ano respectivamente. Em complemento, o consumo *per capita* do maxixe é de 0,06 a 7 Kg no Brasil ao ano, configurando como relativamente baixo e pode estar relacionado ao pouco conhecimento sobre esta hortaliça (Costa, 2014). Há poucos estudos sobre microrganismos endofíticos associados ao maxixe-do-norte e outras cucurbitáceas (Costa, 2014; Khalaf e Raizada, 2016; Brochado *et al.*, 2021; Murthy *et al.*, 2022; Da Silva *et al.*, 2023; Kulandhaivel *et al.* 2025).

Um estudo com sementes de 21 variedades de sete espécies de cucurbitáceas, identificou a identidade dos isolados como Firmicutes e Proteobacteria, tendo o gênero

Bacillus como dominante, representando cerca de 50% dos isolados e presente em todas as espécies analisadas (Khalaf e Raizada, 2016). Adicionalmente, foi investigada a presença e os nichos ocupados por bactérias endofíticas em tecidos de melão, melancia e espécies relacionadas (Glassner, *et al.* 2015).

A família Cucurbitaceae, especialmente *Cucumis* spp., apresenta potencial para a fitorremediação, pois inclui espécies de importância agrícola no Nordeste, como o maxixe-do-norte, com grandes possibilidades de aplicação sustentável. Além disso, apresenta facilidade de crescimento, ciclo curto, resistência a pragas e doenças, como também requer poucos cuidados. Tais características atribuem ao maxixe-do-norte, um potencial candidato em estudos voltados à bioprospecção de comunidades microbianas no desenvolvimento de estratégias sustentáveis de biorremediação (Brochado *et al.*, 2021).

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVOS GERAL

Isolar, caracterizar e investigar a atividade hidrocarbonoclástica e emulsificante de bactérias endofíticas em tecidos de *C. anguria* desenvolvido em solo contaminado artificialmente com óleo lubrificante usado (OLUC).

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Caracterização físico-química do solo e do contaminante (OLUC);
- ❖ Desenvolvimento inicial da planta em diferentes concentrações;
- ❖ Isolamento e identificação dos endófitos;
- ❖ Avaliação do potencial de biodegradação dos isolados via ensaio de crescimento em meio mineral mínimo suplementado com (OLUC)

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 LOCAL DE REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

O estudo foi realizado no Laboratório de Microbiologia Ambiental – LAMA, no Centro de Biotecnologia da Universidade Federal da Paraíba.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA TERRA VEGETAL

Para a condução dos ensaios, utilizou-se terra vegetal adquirida em estabelecimento comercial localizado no município de João Pessoa, Paraíba.

Para as caracterizações químicas e granulometria, foram analisados os seguintes parâmetros: teores de macronutrientes do solo como Nitrogênio, Fósforo, Potássio, Cálcio, Magnésio e enxofre, bem como o teor de sódio. Também foram analisados parâmetros químicos do solo, como hidrogênio e alumínio, capacidade de troca catiônica, teor de carbonato de cálcio, carbono orgânico total, matéria orgânica, pH em água, condutividade elétrica e granulometria. As análises foram realizadas no Laboratório de Irrigação e Salinidade da Universidade Federal de Campina Grande, com uma amostra de 1000 g da terra segundo Manual de análises de solo da EMBRAPA (2017).

A capacidade de retenção de água (CRA) foi determinada pela metodologia descrita por Cavalcanti (2017). Uma amostra de 10 g da terra vegetal foi transferida para um funil contendo papel de filtro e em seguida, compactada com ajuda de um bastão de vidro. Aproximadamente 100 ml de água destilada foram adicionados à terra e a mistura foi deixada em repouso por 30 minutos. O solo foi transferido para cadinhos de porcelana previamente tarados para determinação da massa úmida. Após incubação por 24h e à 105°C, as amostras foram resfriadas e pesadas para determinação da massa seca. A capacidade de retenção de água (CRA) foi calculada empregando a Equação 1:

$$CRA = [(m1 - m2) / m3] \times 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que: m1- massa inicial seca, em gramas; m2- massa final, em gramas e m3- massa inicial úmida, em gramas.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO CONTAMINANTE

Foi utilizada uma mistura de óleo lubrificante residual - OLUC, armazenado em tanques metálicos de uma concessionária de veículos na cidade de João Pessoa. A caracterização do OLUC compreendeu ensaios de densidade, compostos orgânicos totais e hidrocarbonetos derivados do petróleo, incluindo hidrocarbonetos aromáticos policíclicos - HPA e hidrocarbonetos totais do petróleo - TPH. As análises foram realizadas em laboratório particular (Borchardt *et al.*, 2025).

4.4 QUANTIFICAÇÃO BACTERIANA

A quantificação das bactérias na terra antes e após o tratamento foi realizada a fim de estabelecer um perfil microbiológico de base. Para o preparo das amostras, 10 g de amostra foram adicionados a 90 mL de água destilada e mantidos sob agitação por 2 minutos. Em seguida, procedeu-se à realização de diluições seriadas na razão 1:10. A quantificação da população bacteriana foi realizada pela técnica do Número Mais Provável (NMP), utilizando como meio de crescimento o vermelho de fenol, distribuído em microplacas de 96 poços Kasvi®. Foram inoculados 10 µL da suspensão, em cinco repetições. As placas foram incubadas por 24 a 48 h para observação dos poços positivos (cor amarela) e comparação à tabela do NMP. Os resultados foram expressos em NMP/mL (Food And Drug Administration, 1984).

4.5 CONTAMINAÇÃO ARTIFICIAL DA TERRA VEGETAL

Foram utilizados quatro vasos, cada um preenchido com 2 kg da terra. Os solos foram contaminados com diferentes concentrações do OLUC: 0,0; 0,2; 2,0; e 20,0% (m/v). O sistema foi deixado em repouso à temperatura ambiente por 2 meses.

4.6 MAXIXE-DO-NORTE: TRATAMENTO DAS SEMENTES, PLANTIO E DESENVOLVIMENTO

Foram adquiridas sementes de maxixe-do-norte (Topseed Garden®, São Paulo, Brasil), em uma sementeira. Após abertura da embalagem, as sementes foram lavadas com água destilada, deixadas para secar e selecionadas pela sua integridade, isto é, sem quebras, rachaduras ou alteração na cor. Em seguida, as sementes foram dispostas em placas de Petri, entre duas folhas de papel toalha umidificada com cerca de 5 mL de água destilada e armazenadas em ambiente com luz solar, conforme metodologia adaptada de Marcos Filho (2015).

Logo após a protusão da radícula, as sementes foram transferidas cuidadosamente para o solo, com a raiz voltada para baixo e sem cobrir o caule. As sementes foram plantadas em triplicata em recipientes com diferentes concentrações de óleo lubrificante. As plantas foram incubadas por 15 dias.

4.7 MONITORAMENTO DO TRATAMENTO

As amostras de *C. anguria* foram cultivadas em ambiente com luz natural e foram regadas diariamente. Pôde ser observado o crescimento na Figura 2.

Figura 2 – Aspecto de *C. anguria* após 14 dias do plantio



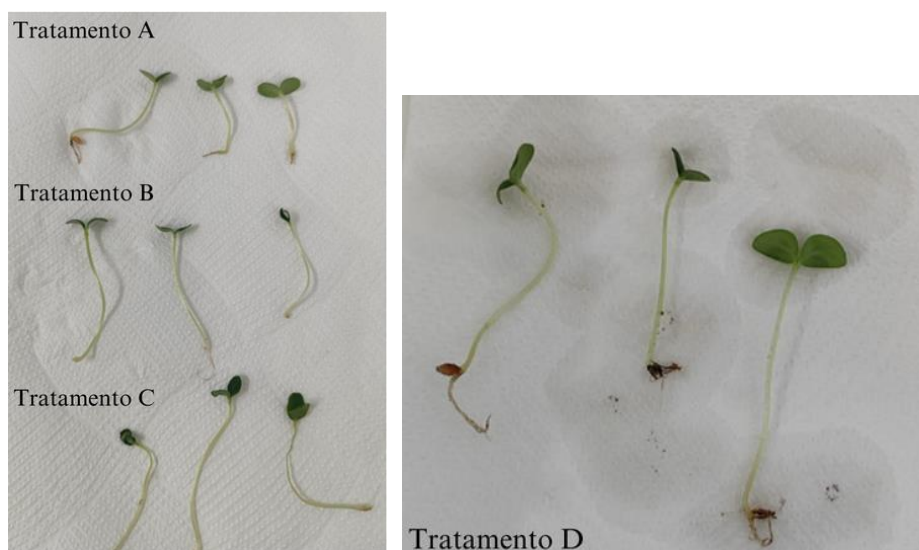
Fonte: a autora.

4.8 ENSAIOS MICROBIOLÓGICOS

4.8.1 ISOLAMENTO DOS ENDOFÍTICOS

Amostras de tecidos vegetais, caule e folhas, foram submetidas a processo de esterilização superficial, primeiramente em solução de água e detergente, seguido por uma lavagem com água destilada. Posteriormente foram imersas em hipoclorito de sódio diluído (2% v/v) e lavadas com água destilada seis vezes (Silva, 2012). Em seguida, inoculadas em ágar nutriente (AN) Kasvi® (Marchut-Mikolajczyk *et al.*, 2018). As placas foram incubadas em Estufa Incubadora BOD - Biochemical Oxygen Demand a 28 °C por sete dias. Durante esse período, colônias bacterianas morfologicamente distintas foram isoladas e purificadas conforme surgiam.

Figura 3 – Amostras de *C. anguria* em cada tratamento utilizadas nos experimentos



Amostras cultivadas com OLUC a: A: 20,0% (m/v); B: 2% (m/v); C: 0,2% (m/v); D: 0%.
Fonte: a autora.

4.8.2 CARACTERIZAÇÃO DOS ISOLADOS

Cada isolado foi repicado em placas de Petri autoclavadas contendo meio BHI pelo método de esgotamento, 24 horas antes da análise por MALDI-TOF. As culturas endofíticas puras foram encaminhadas ao Laboratório Analítico Multiusuário, no Departamento de Ciências Farmacêuticas (DCF) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), e caracterizadas utilizando o MALDI-TOF Biotyper® Sirius One RUO System, pelo método direto (Toubal *et al.*, 2018).

O MALDI-TOF MS (Matrix-Assisted Laser Desorption/Ionization – Time of Flight Mass Spectrometry) é uma técnica de identificação de microrganismos rápida, eficiente, econômica e de alta precisão. Ela se baseia no espectro de massa gerado após a ionização das proteínas do microrganismo, as partículas são aceleradas em um campo elétrico e caracterizadas de acordo com sua massa e tempo de voo. Os espectros obtidos são únicos para cada organismo e podem ser comparados a bancos de dados, permitindo a identificação precisa até o nível de espécie. Um representante de cada espécie foi selecionado para os testes posteriores.

4.8.3 TESTE DE ATIVIDADE HIDROCARBONOCLÁSTICA

A atividade degradadora de hidrocarbonetos pelos endofíticos isolados foi avaliada em microplacas de 96 poços, utilizando meio mineral mínimo (MM), com a

seguinte composição (em mg/L): K_2HPO_4 (0.5 g/L), $(NH_4)_2SO_4$ (0.5 g/L), $MgSO_4$ (0.5 g/L), $FeCl_2$ (10 mg/L), $CaCl_2$ (10 mg/L), $MnCl_2$ (0.1 mg/L), $ZnSO_4$ (0.01 mg/L), pH 7.2 ± 0.2 (Palittapongarnpim *et al.*, 1998) suplementado com OLUC, como única fonte de carbono (Iqbal *et al.*, 2019). Foram adicionados 100 μ L de MM seguidos por 100 μ L de óleo lubrificante, e logo após 10ul de inóculo.

Para o monitoramento da atividade metabólica, foi adicionado, após 15 dias, o indicador redox resazurina, azul e pouco fluorescente, que ao entrar em contato com um ambiente metabolicamente ativo é reduzido devido à transferência de elétrons durante a respiração celular, tornando-o rosa, altamente fluorescente detectável. 20 μ L do indicador foram adicionados em cada poço (Lumactud *et al.*, 2016; Vieira-da-Silva e Castanho 2023). Adicionalmente, foi realizado teste de microgotas para confirmação da sobrevivência das linhagens na matriz, 10 μ L de cada poço foi inoculado em placa de petri com ágar nutriente. O método de plaqueamento em superfície foi realizado conforme o *Compendium of Methods for the Microbiological Examination of Foods* (Salfinger & Tortorello, 2015, p. 83) adaptado pela adição de resazurina como indicador redox.

A atividade tensoativa do sobrenadante livre de células foi avaliada por meio do índice de emulsificação (E_{24}) e do teste de deslocamento de óleo, realizados de acordo com a metodologia descrita por Silva *et al.* (2005). Para a determinação do índice de emulsificação ($E_{(24)}$), o líquido fermentado livre de células foi coletado e centrifugado para remover biomassa. Em seguida, em tubos com capacidade de 2 mL, misturou-se 0,25 mL do sobrenadante com 0,25 mL de óleo lubrificante usado por cerca de 2 minutos em vórtex para formar a emulsão. A mistura foi deixada em repouso por 24 horas e após esse período, mediu-se a altura da camada de emulsão (He) e a altura total da mistura (Ht). O índice de emulsificação E_{24} foi calculado pela Equação 2:

$$E_{24} (\%) = (He / Ht) \times 100 \text{ (Eq. 2)}$$

Para o teste de deslocamento de óleo, adicionou-se uma alíquota com volume de 0,2 mL do sobrenadante sobre uma gota de igual volume do óleo lubrificante. Observou-se qualitativamente se a gota se achatou, o que indica ação superficial do biossurfactante. A extensão do colapso foi comparada a controles sem biossurfactante e a um surfactante comercial. Ambos os ensaios foram realizados em triplicata em temperatura ambiente, 25°C.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1.1 CARACTERIZAÇÕES DA TERRA VEGETAL E DO OLUC

As caracterizações da terra vegetal e do contaminante (OLUC) corresponderam ao total de 20 parâmetros analisados, cujos resultados estão sumarizados na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização das amostras de terra vegetal e do óleo lubrificante empregados nos experimentos.

Parâmetros (unidade)	Terra vegetal	Óleo lubrificante
Ca (cmolc/Kg)	5,29	---
N (g/Kg)	2,08	---
P assimilável (mg/Kg)	413,30	---
Mg (cmolc/Kg)	8,54	---
Na (cmolc/Kg)	2,74	---
K (cmolc/Kg)	4,61	---
H (cmolc/Kg)	0,00	---
Al (cmolc/Kg)	0,00	---
T (molc/Kg)	21,18	---
S (cmolc/Kg)	21,18	---
CaCO ₃	Presença	---
COT (g/Kg)	24,12	---
Matéria Orgânica g/Kg	41,59	---
pH em água	7,46	---
Cond. Elétrica – mmhos/cm (Suspensão Solo-Água)	4,09	---
Granulometria		---
Areia	82,79%	---
Argila	5,15%	---
Silte	12,06%	---
Densidade (g/mL)		0,9542
CRA (%)	18,12	---
TPH (mg.Kg-1)	---	448,000

Gasolina (C8-11)	---	< 10,226
Querosene (C11-14)	---	< 10,226
Diesel (C14-20)	---	< 10,226
Óleo Lubrificante (C20-C40)	---	445,000
16 HAPs Totais (mg.Kg-1)	---	50.1
Naftaleno (mg.Kg-1)	---	45.3
Fenantreno (mg.Kg-1)	---	2.10
Pireno (mg.Kg-1)	---	2.73

Ca = cálcio; N = nitrogênio total; P assimilável = fósforo disponível; Mg = magnésio; Na = sódio; K = potássio trocável; H = hidrogênio; Al = alumínio; T = capacidade de troca catiônica total (CTC total); S = enxofre; CaCO₃ = carbonato de cálcio; COT = carbono orgânico total; Cond. Elétrica = condutividade elétrica da suspensão solo-água; Granulometria = distribuição textural do solo (areia, argila e silte). CRA- Capacidade de retenção de água. TPH – hidrocarbonetos totais do petróleo. HPA – hidrocarbonetos policíclicos aromáticos. O óleo lubrificante apresentou três HAPs acima do limite de quantificação do método, marcados pelo símbolo "<".

5.1.2 QUANTIFICAÇÃO BACTERIANA

O resultado obtido foi de 33×10^5 NMP por grama de areia, indicando a presença de uma comunidade microbiana natural expressiva no solo anteriormente a contaminação.

5.1.3 MONITORAMENTO DO TRATAMENTO

As amostras foram acompanhadas em relação ao crescimento e umidade diariamente, o crescimento vegetal ao final do período determinado está sumarizado na Tabela 2. Durante os 15 dias não foram observados sinais de murcha ou necrose em nenhum dos tratamentos.

Tabela 2 – Altura das amostras de maxixe-do- norte cultivadas em diferentes concentrações de OLUC após 15 dias depois de plantadas

Tratamento	Altura em mm	Número de folhas
A	71,9	2
	52,8	2
	56,3	2
	69,0	2
B	56,8	2
	55,8	2
	50,0	2
	46,6	2

D	52,0	3
	74,0	2
	66,0	2
	60,0	3

Amostras cultivadas com OLUC a: A: 20,0% (m/v); B: 2% (m/v); C: 0,2% (m/v); D: 0%.
Fonte: a autora.

5.1.4 ISOLAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE ENDÓFITOS

Na caracterização por MALDI-TOF foi identificado um total de 18 espécies entre 77 isolados. 15 linhagens não puderam ser identificadas por MALDI TOF e estão indicadas como (---), as identificações foram listadas no Quadro 1. Dentre as identificadas foram 11 bactérias Gram-positivas e 7 bactérias Gram-negativas. Houve também presença de fungos entre os isolados endofíticos, mas não entraram neste estudo. Em complemento, nem todos os isolados foram identificados pela técnica e estão informados.

Quadro 1 – Isolamento de endófitos extraídos de maxixe-do-norte cultivadas em diferentes concentrações de OLUC

Local do isolamento	Gênero
CAULE A	<i>Bacillus cereus_thurigiensis_P_G_III</i>
	<i>Bacillus mycoides_PG_VI</i>

	<i>Bacillus cereus_thurigiensis_P_G_III</i>
	<i>Micrococcus luteus</i>

	<i>Enterobacter hormaechei</i>
	<i>Bacillus cereus_thurigiensis_P_G_IV</i>
	<i>Bacillus cereus_thurigiensis_P_G_III</i>
	<i>Priestia flex</i>
	<i>Enterobacter hormaechei</i>
	<i>Bacillus cereus_thurigiensis_P_G_III</i>
	<i>Bacillus cereus_thurigiensis_P_G_III</i>
	<i>Acinetobacter radioresistens</i>
	<i>Pseudomonas mendocina</i>
	<i>Bacillus cereus_thurigiensis_P_G_III</i>
	<i>Enterobacter hormaechei</i>
	<i>Enterobacter hormaechei</i>
	<i>Bacillus cereus_thurigiensis_P_G_V</i>

	<i>Priestia flexa</i>
	<i>Bacillus cereus_thurigiensis_P_G_III</i>

	<i>Bacillus cereus_thurigiensis_P_G_IV</i>
FOLHA A	<i>Bacillus cereus_thuringiensis_P_G_III</i>
	<i>Bacillus cereus_thuringiensis_P_G_V</i>
	<i>Lysinibacillus fusiformis</i>
	<i>Pseudomonas stutzeri</i>
	<i>Bacillus cereus_thuringiensis_P_G_III</i>
	<i>Micrococcus luteus</i>
	<i>Lysinibacillus fusiformis</i>
	<i>Paenibacillus apiarius</i>
	<i>Bacillus cereus_thuringiensis_P_G_III</i>

CAULE B	<i>Enterobacter hormaechei</i>

	<i>Priestia flex</i>
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>

FOLHA B	----

	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>
	<i>Bacillus cereus_thurigiensis_P_G_IV</i>
	<i>Paenibacillus taiwanensis</i>
	<i>Bacillus cereus_thurigiensis_P_G_IV</i>
	<i>Bacillus cereus_thurigiensis_P_G_III</i>
	<i>Lysinibacillus fusiformis</i>
CAULE C	----
	<i>Bacillus cereus_thurigiensis_P_G_III e IV</i>
	<i>Moraxella osloensis</i>
	<i>Bacillus cereus_thurigiensis_P_G_III</i>
	<i>Bacillus pumilus</i>
	<i>Brevibacterium casei</i>

	<i>Bacillus cereus_thurigiensis_P_G_III</i>
FOLHA C	<i>Enterobacter hormaechei</i>

	<i>Bacillus subtilis</i>
	<i>Bacillus cereus_thurigiensis_P_G_III</i>
	<i>Bacillus cereus_thurigiensis_P_G_III</i>

	<i>Enterobacter hormaechei</i>
	<i>Bacillus cereus_thuringiensis_P_G_III</i>
	<i>Bacillus cereus_thuringiensis_P_G_IV</i>
CAULE D	<i>Staphylococcus saprophyticus</i>

	<i>Bacillus cereus_thuringiensis_P_G_III</i>
	<i>Bacillus cereus_thuringiensis_P_G_III</i>
	<i>Bacillus cereus_thuringiensis_P_G_IV</i>
FOLHA D	<i>Bacillus cereus_thuringiensis_P_G_IV</i>
	<i>Bacillus cereus_thuringiensis_P_G_IV</i>
	<i>Bacillus cereus_thuringiensis_P_G_III</i>
	<i>Staphylococcus saprophyticus</i>
	<i>Enterobacter cloacae</i>

Ca: caule do tratamento A; Fa: folha no tratamento A; Cb: caule no tratamento B; Fc: folha no tratamento B; Cc: caule no tratamento C; Fc: folha no tratamento C; Cd: caule no tratamento D; Fd: folha no tratamento D. (----). Fonte: a autora.

O gênero mais abundante, ou seja, o que esteve mais presente em diferentes tratamentos foi *Bacillus*. Integrantes do gênero, como *B. pumilus*, *B. cereus* / *B. thuringiensis* e *B. mycoides* foram identificados, além disso, houve indicativo de produção de biossurfactantes e do potencial de biodegradação de hidrocarbonetos.

A identificação por MALDI-TOF resultou em *Bacillus cereus/thuringiensis* com classificação nos subgrupos III e IV. Essa nomenclatura reflete a dificuldade da técnica em diferenciar membros filogenética e genômica muito próximos, a ponto de muitos autores considerarem ambos dentro de um complexo de espécies chamado *Bacillus cereus sensu lato* (Schmid *et al.*, 2021) que engloba espécies como *B. cereus*, *B. thuringiensis* e *B. anthracis* (Ehling-Schulz *et al.*, 2019). Para afirmar com precisão a espécie, são necessárias análises complementares, como sequenciamento de genes marcadores ou genômica comparativa (Manzulli *et al.*, 2021; Muigg *et al.*, 2022).

B. cereus sensu lato ou grupo *Bacillus cereus* consiste em bactérias aeróbicas Gram-positivas, em forma de bastonete, formadoras de esporos, que são amplamente distribuídas em ambientes naturais. Além disso, as bactérias do grupo *B. cereus* produzem várias enzimas e metabólitos valiosos e amplamente estudados, como biossurfactantes lipopeptídicos e surfactina, além disso, degradam diferentes tipos de poluentes e promovem o crescimento de plantas (Wu *et al.*, 2019; Schmid *et al.*, 2021; Arora *et al.*, 2024).

De modo geral, *Bacillus cereus/thuringiensis* ocorreu em todos os tratamentos, apontando para sua ampla tolerância e possível papel-chave como endófito em diferentes

condições de contaminação (Kusuma *et al.*, 2009; Khalaf e Raizada, 2016; Kurnia *et al.*, 2018; Tuhuloula *et al.*, 2019).

Os testes tinham por objetivo detectar potencial hidrocarbonoclasticos dos isolados endofíticos. O E₂₄ variou de 19 a 61%, enquanto um percentual de aproximadamente 40% desses isolados, produziram um espalhamento acentuado da gota do óleo (+++). Os resultados dos testes de Índice de emulsificação e deslocamento de óleo estão sumarizados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados dos testes de Índice de emulsificação e deslocamento de óleo.

Espécie	Média E₂₄ (%)	Deslocamento de óleo	Degradação do OLUC
<i>Bacillus cereus/thurigiensis III</i>	56	+++	+++
<i>Bacillus cereus/thurigiensis IV</i>	58	+++	+++
<i>Bacillus mycoides</i>	41	++	---
<i>Micrococcus luteus</i>	38	+++	---
<i>Enterobacter hormaechei</i>	61	++	+++
<i>Priestia flex</i>	59	++	+++
<i>Acinetobacter radioresistens</i>	47	+	+++
<i>Pseudomonas mendocina</i>	57	++	+++
<i>Lysinibacillus fusiformis</i>	49	+++	+++
<i>Pseudomonas stutzeri</i>	51	++	+++
<i>Bacillus pumilus</i>	35	+++	+++
<i>Paenibacillus apiarus</i>	41	+++	+++
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	46	++	+++
<i>Moraxella osloensis</i>	37	++	+++
<i>Brevibacterium casei</i>	30	++	+++
<i>Staphylococcus saprophyticus</i>	46	++	+++
<i>Enterobacter cloacae</i>	50	+++	+++
<i>Bacillus subtilis</i>	47	++	+++
<i>ESPCA3</i>	38	+++	+++
<i>ESPCA4</i>	31	+++	+++
<i>ESPCA13</i>	25	+++	+++
<i>ESPCA18</i>	27	++	+++

<i>ESPCA21</i>	36	++	+++
<i>ESPFA10</i>	26	+	+++
<i>ESPCB3</i>	23	+++	---
<i>ESPCB6</i>	22	+++	---
<i>ESPFB1</i>	19	+++	---
<i>ESPFB3</i>	35	++	+++
<i>ESPFB4</i>	51	+++	---
<i>ESPFC2</i>	25	++	---
<i>ESPFC6</i>	38	++	---
<i>ESPCC4X</i>	40	++	+++
<i>ESPCD2</i>	23	+	---
Caldo nutriente + óleo	26	++	---
Água + óleo	0	0	---

Teste de emulsificação. Teste de espalhamento: de acordo com o nível de espalhamento do óleo, +++ indicando muito espalhado; ++ indicando moderadamente espalhado; + indicando levemente espalhado; 0 não houve espalhamento. Controle (-): indica apenas meio nutriente, sem inóculo. Teste de Biodegradação do OLUC: sim, se houve atividade metabólica positiva indicada pela coloração da resazurina e não, se não houve indicação de atividade metabólica. Teste de degradação do OLUC: +++ indicando alteração na cor da resazurina; --- indicando ausência de mudança de cor.

Os resultados dos testes de emulsificação e deslocamento indicam que várias das bactérias isoladas possuem potencial para produção de biossurfactantes. Destacam-se os representantes do complexo *B. cereus*, grupos III e IV, *E. hormaechei* e *E. cloacae*, *P. aeruginosa*, *P. stutzeri* e *P. mendocina*, *Lysinibacillus fusiformis*, *Priestia flex* e o isolado ESFB6, que apresentaram índices de emulsificação acima ou próximos de 50%, além de reações positivas no teste de deslocamento, sugerindo produção de biossurfactantes. Compostos capazes de reduzir a tensão superficial e estabilizar emulsões.

Vinte de três isolados apresentaram crescimento em meio mineral suplementado com óleo lubrificante como única fonte de carbono, evidenciando sua capacidade de metabolizar hidrocarbonetos. Esse crescimento foi verificado visualmente pela redução do meio devida à atividade metabólica, evidenciada pela resazurina confirmando que os isolados possuem potencial degradador indicados no Tópico 5.1.5. Diversos poços apresentaram crescimento visível considerável como apresentados na Figura 15 (H7/H8/H9: *Bacillus subtilis*).

Entre as bactérias testadas, destacaram-se *Bacillus cereus/thurigiensis* III, *Enterobacter hormaechei*, *Acinetobacter radioresistens*, *Pseudomonas mendocina*,

Lysinibacillus fusiformis, *Paenibacillus apiarus*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus saprophyticus*, cujos índices de emulsificação foram superiores 50 %, deslocamento intenso e crescimento visível, o que sugere maior adaptação metabólica ao uso do óleo como substrato.

Nove isolados não apresentaram crescimento em meio mineral contendo óleo lubrificante como única fonte de carbono, evidenciado pela ausência de alteração na cor da resazurina. Isso indica ausência de capacidade de metabolização direta de hidrocarbonetos para as condições testadas.

Figura 4 – Microgotas de A1/A2/A3: *Bacillus cereus*; A4/A5/A6: *Bacillus cereus*; A7/A8/A9: *Bacillus mycoides*; A10/A11/A12: *Micrococcus luteus*; - B1/B2/B3: *Enterobacter hormaechei*; B4: *Priestia flex*.



Fonte: a autora (2025)

Figura 5 – B5/B6: *Priestia flex*; B7B8/B9: *Acinetobacter radioresistens*;
B10/B11/B12: *Pseudomonas mendocina*



Fonte: a autora (2025)

Figura 6 – C1/C2/C3: *Lysinibacillus fusiformis*; C4/C5/C6: *Pseudomonas stutzeri*;
C7/C8 *Bacillus pumilus*



Fonte: a autora

Figura 7 – C9: *Bacillus pumilus*; C10/C11/C12: *Paenibacillus apiarius*; D1/D2/D3: *Pseudomonas aeruginosa*; D4: *Moraxella osloensis*



Fonte: a autora (2025)

Figura 8 – D5/D6: *Moraxella osloensis*; D7/D8/D9: *Brevibacterium casei*; D10/D11/D12: *Staphylococcus saprophyticus*



Fonte: a autora (2025)

Figura 9: E1/E2 /E3: *Enterobacter cloacae*; E4/E5/E6: ESPCA3; E7/E8: ESPCA4



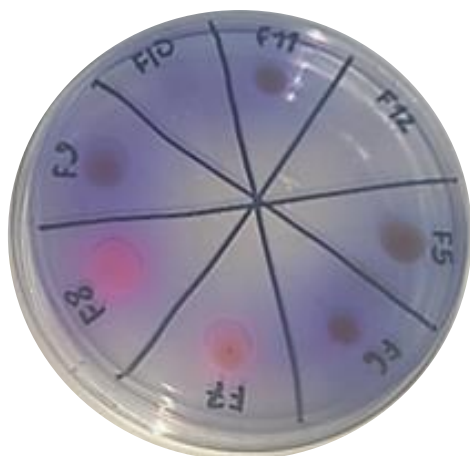
Fonte: a autora (2025)

Figura 10 – E9:ESPCA4; E10/E11/E12: ESPCA13; F1/F2/F3: *Bacillus cereus*. F4: ESPCA21



Fonte: a autora (2025)

Figura 11 - F5/F6: ESPCA21; F7/F8/F9:ESPFA10; F10/F11/F12:ESPCB3



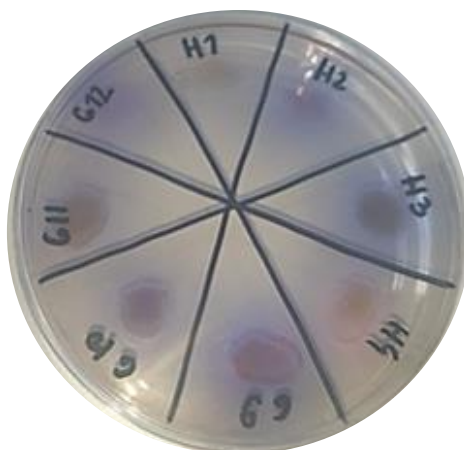
Fonte: a autora (2025)

Figura 12 – G1/G2/G3: ESPCB6; G4/G5/G6:ESPFB1; G7/G8:ESPFB3



Fonte: a autora (2025)

Figura 13 – G9: ESPFB3; G10/G11/G12:ESPFB4; H1/H2/H3: *Lysinibacillus fusiformis*; H4: ESPFC2



Fonte: a autora (2025)

Figura 14 – H5/H6:ESPBF2 H7/H8/H9: *Bacillus subtilis*; H10/H11/H12: *Enterobacter hormaechei*;



Fonte: a autora (2025)

Figura 15 – A--1/A--2/A--3: ESPFC6; A--4/A--5/A--6: ESPCC4X; A--7/A--8: ESPCD2



Fonte: a autora (2025)

No presente estudo, foram isoladas linhagens endofíticas bacterianas, de *C. anguria* cultivado em matriz contaminada por OLUC, e, investigadas quanto ao seu potencial de degradação de óleo lubrificante e produção de biossurfactantes. Ao comparar a abundância de gêneros endofíticos detectados no maxixe -do-norte cultivado em solo contaminado com dados de outros trabalhos, observou-se a ocorrência de grupos previamente associados a ambientes poluídos (Lumactud *et al.*, 2016), reconhecidos pelo metabolismo e genes relacionados à tolerância e ao aproveitamento de hidrocarbonetos (Karas *et al.*, 2021).

Endófitos com capacidade de degradar hidrocarbonetos representam recursos biotecnológicos valiosos para o incremento da eficiência da fitorremediação, uma vez que reduzem a toxicidade dos contaminantes, promovem maior tolerância e crescimento vegetal, e ampliam a degradação de compostos orgânicos em sinergia com o metabolismo da planta (Afzal *et al.*, 2014; Compant *et al.*, 2019). Diferentes grupos de bacterianos endofíticos, tanto Gram-positivos como Gram-negativos, já foram isolados e descritos quanto à sua atuação frente a poluentes orgânicos (Barros, 2017; Iqbal *et al.*, 2019; Karás *et al.*, 2021; Mariano *et al.* 2008).

A composição dos endófitos presentes nas plantas está diretamente relacionada a fatores como as características físico-químicas do solo, o genoma do hospedeiro, o tipo de tecido e a fase de desenvolvimento vegetal, bem como à quantidade e natureza de contaminantes orgânicos presentes (Silva, 2012).

Mais de 200 espécies bacterianas podem degradar hidrocarbonetos de petróleo, incluindo *Pseudomonas*, *Brevibacterium*, *Bacillus*, *Acinetobacter*, *Staphylococcus* e

Micrococcus spp., que desempenham papéis importantes na degradação desses compostos (Mekonnen *et al.*, 2024). Esses microrganismos autóctones utilizam estratégias adaptativas em ambientes contaminados, como mutações genéticas, síntese de enzimas específicas e transferência horizontal de genes, o que lhes confere uma maior versatilidade metabólica e tolerância (Chlebek e Hupert-Kocurek, 2019).

O presente estudo teve sucesso em isolar linhagens de *Bacillus*, *Pseudomonas* sp., *Acinetobacter* sp., *Micrococcus* sp., *Enterobacter* sp., *Priestia* sp., *Lysinibacillus* sp., *Paenibacillus* sp., *Brevibacterium* sp., *Moraxella* sp. e *Staphylococcus* sp.

A presença de microrganismos degradadores de hidrocarbonetos evidenciou uma comunidade microbiana adaptada à presença de óleo, com predominância de *Bacillus* sp., *Pseudomonas* sp., *Enterobacter* sp., *Acinetobacter* sp. e *Paenibacillus* sp. Em menor quantidade, *Brevibacterium* sp., *Moraxella* sp., *Lysinibacillus* sp. e *Priestia* sp. Esse resultado era esperado, segundo relatos anteriores sobre a presença e capacidade degradativa de microrganismos endofíticos em solos contaminados (Karas *et al.*, 2021).

Entre os gêneros bacterianos endofíticos mais frequentemente isolados em diferentes hospedeiros vegetais provenientes de ambientes contaminados, destacam-se *Pseudomonas* e *Bacillus*, ambos reconhecidos por sua ampla versatilidade metabólica e facilidade de cultivo (Compant *et al.*, 2010). *Burkholderia* sp., *Sphingomonas* sp., *Micrococcus* sp., *Microbacterium* sp., *Stenotrophomonas* sp., (Ryan *et al.*, 2008) *Azospirillum* (Taghavi *et al.* 2005), membros das *Enterobacteriaceae* (*Enterobacter* e *Pantoea*) igualmente figuram entre as bactérias mais recorrentes da microbiota endofítica descrita (Chlebek e Hupert-kocurek, 2019).

Um estudo conduzido em sedimentos de betume de Agbabu, no estado de Ondo, Nigéria, revelou que *Bacillus cereus*, *Pseudomonas aeruginosa* e *Micrococcus luteus*, isoladas de ambientes contaminados, foram eficientes na redução de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos – PAHs, tanto individualmente como em consórcio (Olowomofe *et al.*, 2019). De maneira análoga, as mesmas espécies foram isoladas como endófitos do maxixe -do-norte e apresentaram capacidade de utilizar hidrocarbonetos como fonte de carbono, confirmando a relevância desses gêneros na remediação de solos impactados por derivados de petróleo.

Os isolados, no presente trabalho, do complexo *B. cereus* dos grupos III e IV apresentaram 56 e 58% de Índice de emulsificação, respectivamente, e indícios de produção de biosurfactante. As linhagens isoladas do gênero *Pseudomonas*, ou seja, *P. aeruginosa*, *P. stutzeri* e *P. mendocina* apresentaram resultados moderadamente positivos

quanto a produção de biossurfactantes, resultando em índices de emulsificação de 46, 38 e 50%, respectivamente. *Micrococcus luteus* apresentou resultados positivos quanto a produção de biossurfactantes, resultando em índices de emulsificação de 46%. Além disso, os três gêneros foram capazes de utilizar o óleo lubrificante como fonte de carbono.

O gênero *Bacillus* é amplamente reconhecido por sua presença como endófito em plantas e por sua capacidade de colonizar ambientes contaminados por hidrocarbonetos (Karás *et al.*, 2021), além de desenvolver em meios contendo hidrocarbonetos como única fonte de carbono (Marchut-Mikolajczyk *et al.*, 2018), ao exemplo de *B. thuringiensis* (Olowomofe *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2019).

Em estudos anteriores, plantas como *Chelidonium majus* L. revelaram endófitos com alto potencial degradador de hidrocarbonetos, destacando-se *Bacillus pumilus* 2A, que degradou óleo diesel e óleo de motor usado. O isolado demonstrou eficiência na degradação de n-alcanos e compostos aromáticos, incluindo benzeno e tolueno (Marchut-Mikolajczyk *et al.*, 2018). De semelhante modo, *Bacillus mycoides* foi analisado quanto ao seu potencial de biorremediação, cujo resultado demonstrou sua capacidade de reduzir as concentrações de Hidrocarbonetos Totais de Petróleo (Kusuma *et al.*, 2009).

Pseudomonas sp. é amplamente reconhecido por sua diversidade, relevância ecológica e elevada adaptabilidade fisiológica e genética, características que explicam sua ampla distribuição em diferentes ambientes e sua presença como endófito em distintas espécies vegetais (Serrano, 2024). Além disso, apresenta notável versatilidade metabólica, podendo utilizar uma ampla gama de substratos, incluindo hidrocarbonetos alifáticos, alicíclicos, heterocíclicos e aromáticos (Salam, 2016).

Diversos estudos têm relatado linhagens de *Pseudomonas* sp., endofíticas com potencial associado à degradação de hidrocarbonetos, destacando-se também quanto a sua aplicação na biorremediação de óleo lubrificante usado. Um exemplo é a linhagem NMA de *Pseudomonas oleovorans*, que alcançou taxas de remoção entre 98 a 99% de óleo lubrificante usado, em apenas sete dias de incubação (Murti *et al.*, 2020; Nisar *et al.*, 2025).

Adicionalmente, Iqbal *et al.* (2019) isolaram 13 bactérias endofíticas a partir de *Echinochloa crus-galli* e *Cynodon dactylon* cultivadas em solo contaminado com óleo diesel. Dentre essas, *Pseudomonas* sp. J10 destacou-se por sua elevada capacidade de degradação do poluente, além de apresentar atividades funcionais relevantes, como solubilização de fosfato, produção de sideróforos, moléculas orgânicas quelantes de ferro (Serrano, 2024), e atividade de ACC desaminase, enzima que atua reduzindo

diversas manifestações de estresse, além de promover crescimento, resistência e maior sobrevivência (Orozco-Mosqueda, *et al.*, 2020).

Pseudomonas stutzeri é uma bactéria presente no ambiente e como patógeno oportunista de humanos. É frequentemente encontrada em associação com plantas e foi previamente descrita como produtora de biossurfactantes e com potencial de degradar hidrocarbonetos. Foi um dos primeiros microrganismos descritos como degradador de alcanos, bem como por metabolizar aromáticos como benzoato, naftaleno, pireno, PCBs, fenantreno, tolueno, xileno, dentre outros (Lalucat *et al.*, 2006).

Semelhantemente, diversos estudos analisaram o potencial de *P. aeruginosa* em relação a produção de biossurfactantes e degradação de poluentes derivados do petróleo (Santos 2011; Cavalcanti, 2017; Pawlik *et al.*, 2017; Obot *et al.*, 2024), além disso, é uma espécie frequentemente associada à produção de ramnolipídeos e reconhecido por seu potencial patogênico e oportunista (Lopes, 2014).

Diversos estudos recentes destacam o papel de *Pseudomonas mendocina* na biodegradação e biorremediação de ambientes contaminados por hidrocarbonetos. A linhagem *P. mendocina* H-3, por exemplo, foi aplicada em solos contaminados de depósitos petrolíferos no Cazaquistão, causando uma redução significativa nas frações de óleo e degradação considerável de compostos mono- e bicicloaromáticos (Doszhanov *et al.*, 2024).

Semelhantemente, um isolado de sedimentos marinhos e água do Porto de Oran, na costa da Argélia, demonstrou capacidade de crescer utilizando até 10% (v/v) de óleo bruto como única fonte de carbono, mesmo em diferentes condições de salinidade, pH e temperatura, evidenciando seu potencial em ambientes marinhos (Faiza, 2020). Além disso, revisões sistemáticas reforçam a presença de *P. mendocina* entre os principais microrganismos associados à degradação de hidrocarbonetos em ambientes contaminados, especialmente em solos e sedimentos poluídos (Rache-Arce *et al.*, 2022).

Micrococcus sp. destaca-se por sua tolerância a ambientes poluídos e pelo uso de moléculas orgânicas tóxicas como fontes de carbono, já foi apontado que esse gênero tem potencial para degradação de hidrocarbonetos e apresenta genes catabólicos associados a enzimas que quebram esses compostos. Sendo reconhecido como um microrganismo potencialmente útil para processos de biorremediação (Olowomofe *et al.*, 2019).

Os isolados correspondentes de *P. apiarius* apresentaram índices de emulsificação de 41%, além da capacidade de degradação do OLUC e resultados positivos no deslocamento do óleo. *B. flexus*, recentemente reclassificada como *Priestia flex*,

apresentou um índice de emulsificação de aproximadamente 33%, acompanhando pelo teste de deslocamento que foi considerado moderadamente positivo enquanto isso, *E. hormaechei* e *E. cloacae*, isolados dos tecidos de *C. anguria*, apresentaram índices de emulsificação 61% e 28%, respectivamente, pode ser observado deslocamento intenso do óleo com a adição do sobrenadante de *E. hormaechei*. *P. flex*, e degradação do OLUC e resultados positivos no deslocamento do óleo, ou seja, sugestivo de produção de biossurfactantes.

Paenibacillus sp. inclui diversos representantes endofíticos bem documentados e já foi isolado de ambientes contaminados, apresentando potencial para a degradação de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos – PAHs e produção de biossurfactantes em linhagens provenientes de petróleo bruto (Gudiña *et al.*, 2015). Além disso, isolados de *Paenibacillus* demonstraram capacidade de degradar poluentes gerados durante a extração, refino e transporte de petróleo e seus derivados (Grady *et al.*, 2016).

De forma semelhante, *Enterobacter hormaechei* tem sido descrita como endófito (Tshishonga *et al.*, 2019), enquanto isolados do complexo *Enterobacter* vêm sendo investigados quanto à sua capacidade de degradar frações petrolíferas, apresentando atividade relevante sobre diferentes hidrocarbonetos (Khanafer *et al.*, 2017; Sui *et al.*, 2023). Em complemento, *Enterobacter cloacae*, demonstrou, em estudos experimentais realizados em solos contaminados, a habilidade de utilizar alcanos, como o hexadecano, como fonte de carbono, evidenciando seu potencial para aplicações em biorremediação. (Mukherjee *et al.*, 2016) adicionalmente, o isolado *E. cloacae* E1, apresentou capacidade de degradação de petróleo, e um índice de atividade de emulsão de 62% (Zarei *et al.*, 2021).

Priestia spp. são descritas na literatura como bactérias endófitas produtoras de biossurfactantes e degradadoras de hidrocarbonetos de alcanos, dentro desse gênero destaca-se *Priestia megaterium* ZS16, isolado que apresentou atividade surfactante em relação a derivados de petróleo (Siddiqui *et al.*, 2023). Corroborando estudos anteriores, *Priestia flexa*, isolada no presente trabalho demonstrou intensa atividade biossurfactante, com um índice de emulsificação superior a 50%.

Análises genômicas e experimentais recentes indicam potencial para degradação de petróleo e outros poluentes xenobióticos por *Lysinibacillus* sp. Em 2022 um estudo identificou uma linhagem de *Lysinibacillus* sp. Y316 que foi capaz de degradar resinas e asfaltenos, além disso, produziu biossurfactantes glicolipídicos que promoveram a biodegradação em areias betuminosas (Ying *et al.*, 2022). Outro estudo avaliou o

potencial de *L. fusiformis* MGMM7 associado à raiz do trigo na degradação de contaminantes xenobióticos, como petróleo bruto, fenol e corantes azo, além de conseguir degradar até $44,55 \pm 5,47\%$ de petróleo bruto e reduzir sua toxicidade em experimentos de solo contaminado com *Lepidium sativum* L. (agrião), promoveu o crescimento de plantas em solo poluído com petróleo bruto (Diabankana *et al.*, 2024).

Adicionalmente, *Brevibacterium casei* e *Staphylococcus saprophyticus* também apresentaram resultados promissores quanto à produção de biossurfactantes, evidenciado pelos resultados do teste de emulsificação, de 30% e 39%, respectivamente. Em ambos foi observado deslocamento moderado do óleo lubrificante.

Um estudo em 2021, apontou *Brevibacterium* sp. como linhagem altamente eficiente na degradação de óleo e produção de biossurfactantes. Em comparação com outras espécies do mesmo estudo, *Brevibacterium* sp. KY283128 apresentou o maior nível de degradação de óleo, degradando cerca de 97% sendo considerada adequada para estudos com biodegradação em áreas contaminadas por petróleo e refinarias de petróleo (Zarei *et al.*, 2021).

Em relação a *Staphylococcus saprophyticus*, seu potencial na biorremediação de hidrocarbonetos através da produção de biossurfactantes tem sido avaliado. Um estudo isolou espécimes psicrotolerantes de *S. saprophyticus* do Oceano Antártico, com capacidade de degradar o surfactante aniônico SDS em concentrações elevadas, cerca de 88,9 % a $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, a 20 °C e pH 7 (Arora *et al.*, 2024).

Outro estudo demonstrou que *S. saprophyticus* isolado de solo contaminado com hidrocarbonetos foi eficaz na degradação de óleo de motor como única fonte de carbono, produzindo um biossurfactante glicolipídico. Além disso, o isolado foi empregado em células microbianas de combustível com ânodo modificado com nanopartículas de Fe_2O_3 , resultando em uma taxa de degradação de 93 % e densidade de potência de $10,2 \text{ W/m}^3$, o que evidencia a viabilidade de biorremediação e recuperação de energia simultâneas (Naaz *et al.*, 2024).

Moraxella osloensis foi isolada de forma pontual nas amostras, não é uma espécie que figura dentre os grupos mais clássicos para degradação de compostos e hidrocarbonetos. Entretanto, estudos recentes têm demonstrado que *Moraxella* spp., incluindo *M. osloensis*, apresentam potencial metabólico para a degradação de substâncias complexas e xenobióticos, como surfactantes e compostos aromáticos, além de indícios que sugerem a produção de biossurfactantes. Especificamente, *M. osloensis* foi descrita degradadora de corantes têxteis de difícil quebra, atingindo taxas de remoção

superiores a 80%, além de utilizar acrilamida como única fonte de carbono e nitrogênio, demonstrando adaptabilidade metabólica e produção de enzimas específicas (Emmanuel *et al.*, 2013; Sharma *et al.*, 2009).

Adicionalmente, estudos com consórcios microbianos mostraram que linhagens de *Moraxella* sp. possuem capacidade de emulsificação de hidrocarbonetos, como xileno, sugerindo que o gênero pode contribuir tanto para a mobilização como para a biodegradação de frações presentes em óleos e combustíveis (Barros, 2017). Esses dados sustentam a hipótese de que *M. osloensis* isolada de solos contaminados pode ter relevância na biorremediação de ambientes impactados por hidrocarbonetos. No presente trabalho *M. osloensis* apresentou Índice de emulsificação de 34% e promoveu deslocamento moderado do óleo.

Vale destacar que os ambientes contaminados submetem as bactérias do solo e da rizosfera a fortes pressões seletivas, como alta concentração de poluentes. Dessa forma, bactérias adaptadas podem migrar para o interior dos tecidos vegetais, onde a concentração de contaminantes é significativamente menor e as condições ambientais são mais estáveis, embora ainda com estresses oxidativos e metabólicos, permitindo sua permanência (Ma *et al.*, 2016). Essa translocação pode representar uma estratégia de sobrevivência microbiana, ao mesmo tempo em que contribui para a adaptação da planta ao estresse químico (Wu *et al.*, 2019; Qiao *et al.*, 2025).

Os 9 isolados que não apresentaram crescimento em meio mineral contendo óleo lubrificante como única fonte de carbono, indicado pela cor da resazurina, evidenciam a incapacidade de metabolização direta de hidrocarbonetos para as condições testadas. Essa limitação sugere que essas bactérias podem depender de co-substratos, de interações com outros microrganismos ou não possuem vias metabólicas para utilização de óleo como fonte exclusiva de carbono.

A comunidade endofítica isolada mostrou um padrão coerente com seleção por contaminação: o tratamento A, com 20% de OLUC, apresentou maior riqueza de isolados e uma maior frequência de gêneros clássicos ligados à degradação de hidrocarbonetos como *Pseudomonas*, *Enterobacter* e *Acinetobacter*. O que corresponde a estudos que documentam a composição da microbiota em solos contaminados (Lumactud *et al.*, 2018; Yousaf *et al.*, 2011; Wu *et al.*, 2019).

No tratamento B, com 2% de OLUC, observou-se menor diversidade, porém com predominância de *Pseudomonas aeruginosa*, corroborando sua importância como degradadora versátil em concentrações intermediárias de poluentes (Onbasili *et al.*,

2011). Já o tratamento C, com 0,2% de OLUC demonstrou uma comunidade mista, na qual *Bacillus* ainda se destacaram, mas foram acompanhados de espécies como *Moraxella osloensis* e *Brevibacterium casei*.

O tratamento D, com ausência de contaminação por óleo lubrificante apresentou pouca diversidade bacteriana quando comparada com os outros tratamentos. Isso pode se dar devido à seleção de linhagens com maior tolerância e com perfis metabólicos que permitam o uso do OLUC como fonte de carbono (Káras *et al.*, 2021). Adicionalmente, o estabelecimento de novos nichos metabólicos para microrganismos degradadores pode ter contribuído para o aumento da diversidade local de espécies especialistas nos tratamentos com presença do contaminante. A não contaminação e ausência de estresse químico podem ter favorecido uma configuração microbiana de espécies endofíticas mais generalista (Shi *et al.*, 2022).

Já foi relatada na literatura a alteração na composição da microbiota em solos contaminados em relação com solos sem poluentes, nos quais, foi demonstrado que os gêneros dominantes no solo mudaram e a abundância relativa de grupos bacterianos degradadores aumentou (Lumactud *et al.*, 2016). A concentração de poluentes cria regiões, nas quais determinados grupos tolerantes, especializados e adaptados proliferam, enquanto em áreas com menor nível ou sem poluição, predominam grupos menos tolerantes (Kracmarova-Farren *et al.*, 2023). Pois, menor estresse ou ausência de contaminantes tendem a favorecer uma microbiota generalista com ampla amplitude de nicho, sem adaptações específicas para a presença de contaminantes, devido à redução na pressão seletiva, enquanto ambientes contaminados conduzem a uma seleção de especialistas tolerantes ou degradadores dos contaminantes (Qi *et al.*, 2022).

Grande parte dos táxons observados são associados, na literatura, à degradação de hidrocarbonetos. Vale ressaltar que espécies degradadoras são frequentemente associadas a transferência horizontal de genes, o que poderia aumentar a abundância de genes funcionais, como *alkB*, *nah*, *rhl*, no ambiente, permitindo a permanência de espécies em um ambiente, não apenas nutricionalmente rico, mas também com nutrientes biodisponíveis devido à presença e produção de biosurfactantes (Yousaf *et al.*, 2011; Olowomofe *et al.*, 2019).

Vale destacar as limitações metodológicas oriundas dos perfis bacterianos obtidos, os quais são dependentes de isolamento em cultura. Ou seja, microrganismos facilmente cultiváveis são favorecidos em detrimento de fastidiosos e não cultiváveis, o que poderia subestimar taxações.

Os isolados endofíticos do maxixe-do-norte (*C. anguria*) apresentaram crescimento em meio mineral suplementado com óleo lubrificante como única fonte de carbono. Os resultados que vários dos microrganismos associados ao maxixe-do-norte possuem capacidade de adaptação e degradação de óleo lubrificante, corroborando estudos prévios sobre microbiota de plantas em solos contaminados (Umar *et al.*, 2013; Ekanem e Ogunjobi, 2017). A predominância de *Bacillus* e *Pseudomonas*, reforça o papel desses gêneros na biodegradação de hidrocarbonetos complexos (Kurnia *et al.*, 2018; Nisar *et al.*, 2025).

C. anguria é uma planta de cultivo rápido e relativamente simples, amplamente utilizada na região Nordeste e bem adaptada às condições climáticas locais. Além de seu valor regional, a espécie apresentou capacidade de hospedar uma diversidade de microrganismos endofíticos e de tolerar ambientes adversos, características que a destacam como um modelo promissor de estudo dentro das cucurbitáceas (Cheema *et al.*, 2015; Khalaf e Raizada, 2016; Lumactud *et al.*, 2016).

É importante ressaltar que em razão do potencial de transferência de hidrocarbonetos e de bioacumulação de compostos associados ao óleo lubrificante para tecidos vegetais como metais, os frutos de *C. anguria* cultivados nas parcelas contaminadas não devem ser consumidos até que análises confirmem concentrações dentro de limites seguros (Liu, *et al.* 2024). Estudos prévios mostram bioacumulação de HPAs em partes aéreas de plantas expostas a contaminantes petrolíferos (Meudec *et al.*, 2006).

Estudos recentes indicaram que todas as partes aéreas das plantas, folhas, frutos, sementes, caules e flores podem bioacumular hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), bem como outros compostos associados a óleos lubrificantes, como metais pesados (Ma *et al.*, 2016; Bhardwaj, 2025). Esse processo pode ocorrer via deposição atmosférica ou por translocação interna, além disso, o nível da bioacumulação é multifatorial, se relacionando com fatores interligados como: espécie vegetal, propriedades do contaminante, como peso molecular e hidrofobicidade. Os HPAs de baixa massa molecular tendem ser mais facilmente absorvidos e translocados para partes aéreas enquanto os de alta massa molecular acumulam mais nas raízes e na rizosfera. (Cao *et al.*, 2024).

Adicionalmente, interferem também características associadas a fisiologia vegetal como o conteúdo lipídico e ceroso das folhas e frutos, pois quanto maior a quantidade de lipídios maior será a afinidade do tecido para compostos hidrofóbicos

(Meudec *et al.*, 2006; Molina; Segura, 2021). Outros fatores como taxa de transpiração, arquitetura radicular, área de contato com solo contaminado, tricomas, cutícula e ceras, matéria orgânica do solo, pH, umidade e microbiota rizosférica também estão ligados (Sampaio, 2015; Li *et al.*, 2017). Logo, a variação é diretamente relacionada com o gênero e a espécie, portanto plantas expostas ao mesmo solo podem apresentar perfis de acumulação distintos (Tarigholizadeh *et al.*, 2024).

Apesar do potencial promissor, a aplicabilidade em larga escala ainda enfrenta limitações, como a variabilidade entre os isolados e a dependência das condições ambientais. Além disso, o trabalho foi conduzido em condições controladas de laboratório, o que não reflete plenamente a complexidade e variabilidade de ambientes naturais contaminados, onde fatores como pH, disponibilidade de nutrientes, umidade e presença de poluentes mistos podem interferir na tolerância das plantas e dos microrganismos associados (Umar *et al.*, 2013).

Adicionalmente, a identificação dos isolados foi baseada em caracterizações fenotípicas e funcionais, não abrangendo análises moleculares mais detalhadas que poderiam revelar genes específicos de degradação, como *alkB*, *CYP153* e *pah* (Káras *et al.*, 2021). Para pesquisas futuras, recomenda-se a realização de experimentos em escala de campo para avaliar a aplicabilidade prática da técnica, bem como a utilização de ferramentas genômicas e metagenômicas para a caracterização dos isolados.

É importante observar que foram identificados, por MALDI-TOF, microrganismos endógenos no OLUC utilizado no presente trabalho. Agrupados como *Kocuria flava*, *Bacillus mycoides* e *Bacillus cereus/thuringiensis*, possivelmente já adaptados a esse tipo de substrato, e, utilizando o OLUC como única fonte de carbono. As 3 espécies já foram descritas na literatura como degradadores de hidrocarbonetos (Káras *et al.*, 2021; Sakshi e Haritash, 2021; Chlebek e Hupert-kocurek, 2019).

Isso implica que a atividade metabólica detectada pela resazurina não pode ser atribuída exclusivamente às bactérias endofíticas inoculadas, podendo refletir tanto o metabolismo das bactérias inoculadas como presentes no óleo (Kusuma *et al.*, 2009; Kurnia *et al.*, 2018; Tuhuloula *et al.*, 2019). Entretanto, os resultados do teste de microgotas fornecem indícios de que a sobrevivência indicada pela resazurina possa ser dos microrganismos endofíticos inoculados, devido à presença de diversos resultados negativos, ou seja, sem presença de atividade metabólica nem pelos endofíticos nem pelos endógenos.

Outra hipótese seria a atividade sinérgica entre algumas espécies, na qual, um microrganismo poderia favorecer a biodisponibilidade dos componentes do OLUC enquanto outra realiza a degradação efetiva desses componentes, favorecendo a sobrevivência conjunta (Barros, 2017; Olowomofe *et al.*, 2019; Siddiqui *et al.*, 2023; Taleshpur *et al.*, 2025).

Esses microrganismos podem ter desempenhado um papel na colonização dos tecidos de *C. anguria* e, potencialmente, na contribuição para a comunidade endofítica por meio da transferência de genes envolvidos nos processos de biodegradação do óleo (Taghavi *et al.*, 2005). Além, disso, as populações autóctones do óleo podem ter contribuído de outras formas: competindo diretamente pelos recursos, inibindo o crescimento das linhagens inoculadas, estabelecendo interações sinérgicas que favoreceram a biodisponibilização de compostos, ou mesmo dominando a comunidade final (Afzal *et al.*, 2014; Qiao *et al.* 2025).

A produção de biossurfactantes por alguns dos isolados endofíticos sugere um potencial de permanência e atividade metabólica em meio ao óleo. Isto pode estar associado à resposta com o revelador resazurina (Marchut-Mikolajczyk *et al.*, 2018), indicando a participação dessas bactérias no processo de utilização do contaminante.

Assim, embora os resultados apontem atividade microbiana, não é possível discernir, nesta etapa, o quanto essa resposta se deveu às bactérias introduzidas ou às nativas do óleo. Essa limitação deve ser considerada na interpretação dos dados, sendo recomendada, em trabalhos futuros, a realização de ensaios com óleo previamente esterilizado ou identificação taxonômica da comunidade bacteriana final.

A seleção de linhagens, consórcios endofíticos mais eficientes e análises da interação dos endófitos com outros contaminantes presentes no solo, como metais pesados, aliadas ao avanço de tecnologias de inoculação e ao uso de plantas de fácil manejo poderão contribuir para consolidar o uso de microrganismos associados a plantas, como o maxixe-do-norte, em programas de recuperação de áreas impactadas por óleo lubrificante e outros derivados do petróleo.

5. CONCLUSÃO

Os resultados do presente trabalho indicaram que microrganismos endofíticos isolados do maxixe-do-norte (*C. anguria*), cultivado em ambiente contaminado por

hidrocarbonetos de óleo lubrificante usado (OLUC), possuem capacidade de atuar em estratégias de degradação, evidenciando o potencial da associação planta–microrganismo na biorremediação de solos contaminados. O uso de endófitos com essa habilidade, em estratégias de fitorremediação assistida, representa uma alternativa sustentável e de baixo impacto ambiental frente às técnicas tradicionais. Dessa forma, *C. anguria* se destaca como uma espécie de interesse biotecnológico, com viabilidade para aplicação em estratégias inovadoras de recuperação de áreas impactadas por hidrocarboneto.

REFERÊNCIAS

- AFZAL, M.; KHAN, Q M.; SESSITSCH, A. Endophytic bacteria: Prospects and applications for the phytoremediation of organic pollutants. **Chemosphere**, v. 117, p. 232–242, 2014. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S004565351400825X>>. Acesso em: 23 ago. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. **Produção de derivados de petróleo e processamento de gás natural**. Brasília, 10 jul. 2020. Atualizado em 24 fev. 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural>>. Acesso em: 18 ago. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. **Produção de petróleo e gás em 2024 se mantém estável com relação ao recorde de 2023**. Brasília, 03 fev. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/canal_atendimento/imprensa/noticiascomunicados/producao-de-petroleo-e-gas-em-2024-se-mantem-estavel-com-relacao-ao-recorde-de2023>. Acesso em: 24 ago. 2025.
- AJJAM, S. Bioremediation of Petrol Engine Oil Contaminated Soils With Pyoverdine From *Pseudomonas Putida*. **Physical Sciences, Life Science and Engineering**, v. 2, n. 2, p. 10, 2025. Disponível em: <<https://digital-science.pubmedia.id/index.php/pslse/article/view/334>>. Acesso em: 23 ago. 2025.
- ARORA, J.; CHAUHAN, A; RANJAN, A.; *et al.* Degradation of SDS by *psychrotolerant Staphylococcus saprophyticus* and *Bacillus pumilus* isolated from Southern Ocean water samples. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 55, n. 2, p. 1507–1519, 2024. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/s42770-024-01294-1>>. Acesso em: 29 set. 2025.
- BAR-ON, Y. M.; PHILLIPS, R.; MILO, R. The biomass distribution on Earth. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 115, n. 25, p. 6506–6511, 2018. Disponível em: <<https://pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1711842115>>. Acesso em: 23 ago. 2025.
- BARROS, A. R. **Avaliação da degradação do óleo diesel por cepas bacterianas isoladas da Amazônia**. 2017. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2017. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/7927>.
- BENGUENAB, A.; CHIBANI, A. Biodegradation of petroleum hydrocarbons by filamentous fungi (*Aspergillus ustus* and *Purpureocillium lilacinum*) isolated from used engine oil contaminated soil. **Acta Ecologica Sinica**, v. 41, n. 5, p. 416–423, 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S187220322030216X>>. Acesso em: 24 ago. 2025.
- BHARDWAJ, A. Endophytes unleashed: natural allies for heavy metal bioremediation. **Discover Plants**, v. 2, n. 1, p. 57, 2025. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/s44372-025-00137-z>>. Acesso em: 24 ago. 2025.
- BIKTASHEVA, L.; GORDEEV, A; KIRICHENKO, A.; *et al.* Screening of Microorganisms from Wastes and Identification of the Optimal Substrate for Biosurfactant Production. **Microbiology Research**, v. 15, n. 1, p. 152–163, 2024. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2036-7481/15/1/10>>. Acesso em: 29 set. 2025.
- BIKTASHEVA, L.; GORDEEV, A.; USOVA, A.; *et al.* Bioremediation of Oil-Contaminated Soils Using Biosurfactants Produced by Bacteria of the Genus *Nocardiopsis sp.* **Microbiology Research**, v. 15, n. 4, p. 2575–2592, 2024. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2036-7481/15/4/171>>. Acesso em: 23 ago. 2025.
- BOLAJI, A. S; LIASU, M. O; AYANDELE, A. A; *et al.* Assessing the synergistic relationship of mycorrhiza and bacteria for the degradation of spent engine oil in maize grown soil. **Bulletin of the National Research Centre**, v. 44, n. 1, p. 43, 2020. Disponível em: <<https://BNRC.springeropen.com/articles/10.1186/s42269-020-00293-0>>. Acesso em: 23 ago. 2025.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Coleta de óleo lubrificante usado ou contaminado, ano 2024 (ano base 2023): relatório em atendimento à Resolução CONAMA nº 362/2005 sobre óleos lubrificantes usados e/ou contaminados (OLUC)**. Brasília, 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/>>. Acesso em: 18 ago. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Relatório em atendimento à Resolução CONAMA nº 362/2005 sobre óleos lubrificantes usados e/ou contaminados (OLUC)**. Brasília, jul. 2024. Disponível em: < <https://www.gov.br/mma/pt-br>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

BROCHADO, M. G. D. S.; RIBEIRO, A. C. M.; SILVA, C. N. D.; *et al.* Biometria de *Cucumis anguria* inoculada com microrganismos promotores de crescimento. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 6, p. 160–167, 2021. Disponível em: <<https://www.sustenere.co/index.php/rica/article/view/5802>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

CAO, C.; WU, Y.; LV, Z.; *et al.* Uptake of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from PAH-contaminated soils to carrots and Chinese cabbages under the greenhouse and field conditions. **Chemosphere**, v. 360, p. 142405, 2024. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045653524012980>>. Acesso em: 11 out. 2025.

CAVALCANTI, T. G. **Isolamento e utilização de *Pseudomonas aeruginosa* na biorremediação de solos contaminados por hidrocarbonetos policíclicos aromáticos**. 2017. 55 f. Monografia (Bacharelado em Biotecnologia) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

CHEEMA, S.; LAVANIA, M.; LAL, B. Impact of petroleum hydrocarbon contamination on the indigenous soil microbial community. **Annals of Microbiology**, v. 65, n. 1, p. 359–369, 2015. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s13213-014-0868-1>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

CHLEBEK, D.; HUPERT-KOCUREK, K. Endophytic Bacteria In The Phytodegradation Of Persistent Organic Pollutants. *Postępy Mikrobiologii - Advancements of Microbiology*, v. 58, n. 1, p. 70–79, 2019. Disponível em: <<https://www.sciendo.com/article/10.21307/PM-2019.58.1.070>>. Acesso em: 24 ago. 2025.

CLARO, E. M. T. **Biodegradação de gasolina e óleo diesel utilizando biossurfactantes e *Pseudomonas putida* com plasmídio TOL**. 2017. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas – Microbiologia Aplicada) – Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Rio Claro, 2017. Disponível em: < <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/866af1c8-7864-4865-a237f92c8018f2a9>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

COMPANT, S.; CLÉMENT, C.; SESSITSCH, A. Plant growth-promoting bacteria in the rhizo- and endosphere of plants: Their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 5, p. 669–678, 2010. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038071709004398>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

COSTA, H. G. **Produtividade de cultivares de maxixe-do-norte (*Cucumis anguria* L.) em diferentes sistemas de cultivo**. 2014. 41 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia Tropical) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2014. Disponível em: < <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/7068>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

DAÂSSI, D.; QABIL ALMAGHRIBI, F. Petroleum-contaminated soil: environmental occurrence and remediation strategies. **3 Biotech**, v. 12, n. 6, p. 139, 2022. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/s13205-022-03198-z>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

DHAKA, A.; CHATTOPADHYAY, P. A review on physical remediation techniques for treatment of marine oil spills. **Journal of Environmental Management**, v. 288, p. 112428, 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479721004904>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

DIABANKANA, R. G. C.; ZHAMALBEKOVA, A. A.; SHAKIROVA, A. E.; *et al.* Genomic Insights of Wheat Root-Associated *Lysinibacillus fusiformis* Reveal Its Related Functional Traits for Bioremediation of Soil Contaminated with Petroleum Products. **Microorganisms**, v. 12, n. 11, p. 2377, 2024. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-2607/12/11/2377>>. Acesso em: 21 set. 2025.

DIÓGENES, P. R. A. **Mapeamento de processos para a identificação de pontos críticos da logística reversa do óleo lubrificante usado ou contaminado: um estudo de caso**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) – Campus de Russas, Universidade Federal do Ceará, Russas, 2025. Disponível em: < <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/80124>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

DOSZHANOV, Y.; SABITOV, A.; MANSUROV, Z.; *et al.* Bioremediation of Oil-Contaminated Soils of the Zhanazhol Deposit from West Kazakhstan by *Pseudomonas mendocina* H-3. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2024, p. 1–13, 2024. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/aess/2024/8510911/>>. Acesso em: 30 set. 2025.

DURAND, A.; LEGLIZE, P.; BENIZRI, E. Are endophytes essential partners for plants and what are the prospects for metal phytoremediation? **Plant and Soil**, v. 460, n. 1–2, p. 1–30, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1078/0944-5013-00075>. Acesso em: 20 set. 2025.

EKANEM, J.O.; OGUNJOBI, A.A. Hydrocarbon degradation potentials of bacteria isolated from spent lubricating oil contaminated soil. **Journal of Applied Sciences and Environmental Management**, v. 21, n. 5, p. 973, 2017. Disponível em: <https://www.ajol.info/index.php/jasem/article/view/163360>. Acesso em: 24 ago. 2025.

EMMANUEL, S. J. J.; LAKSHMIKANDAN, M.; RAJESH, R.P.; *et al.* Biodegradation of acrylamide and purification of acrylamidase from newly isolated bacterium *Moraxella osloensis* MSU11. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 85, p. 120–125, 2013. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0964830513002254>. Acesso em: 25 set. 2025.

FAIZA, B. M. Hydrocarbon-Degrading Bacterial Strain *Pseudomonas mendocina* Newly Isolated from Marine Sediments and Seawater of Oran Harbor (Algerian Coast). **Archives of Ecotoxicology**, v. 2, n. 2, p. 22–29, 2020. Disponível em: <https://office.scicell.org/index.php/AE/article/view/141>. Acesso em: 30 set. 2025.

FATIMA, K.; IMRAN, A.; AMIN, I.; *et al.* Successful phytoremediation of crude-oil contaminated soil at an oil exploration and production company by plants-bacterial synergism. **International Journal of Phytoremediation**, v. 20, n. 7, p. 675–681, 2018. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15226514.2017.1413331>. Acesso em: 23 ago. 2025.

FÜRNKRANZ, M.; ADAM, E.; MÜLLER, H.; *et al.* Promotion of growth, health and stress tolerance of Styrian oil pumpkins by bacterial endophytes. **European Journal of Plant Pathology**, v. 134, n. 3, p. 509–519, 2012. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10658-012-0033-2>. Acesso em: 23 ago. 2025.

FÜRNKRANZ, M.; LUKESCH, B.; MÜLLER, H.; *et al.* Microbial Diversity Inside Pumpkins: Microhabitat-Specific Communities Display a High Antagonistic Potential Against Phytopathogens. **Microbial Ecology**, v. 63, n. 2, p. 418–428, 2012. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00248-011-9942-4>. Acesso em: 23 ago. 2025.

GLASSNER, H.; ZCHORI-FEIN, E.; COMPANT, S.; SESSITSCH, A.; KATZIR, N.; PORTNOY, V.; YARON, S. Characterization of endophytic bacteria from cucurbit fruits with potential benefits to agriculture in melons (*Cucumis melo* L.). **FEMS Microbiology Ecology**, Oxford, v. 91, n. 7, p. fiv074, 16 jul. 2015. DOI: 10.1093/femsec/fiv074. Disponível em: <https://academic.oup.com/femsec/article/91/7/fiv074>. Acesso em: 23 ago. 2025.

GRADY, E. N.; MACDONALD, J.; LIU, L.; *et al.* Current knowledge and perspectives of *Paenibacillus*: a review. **Microbial Cell Factories**, v. 15, n. 1, p. 203, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12934-016-0603-7>. Acesso em: 11 set. 2025.

GUDIÑA, E. J.; PEREIRA, J. F.; COSTA, R.; *et al.* Novel bioemulsifier produced by a *Paenibacillus* strain isolated from crude oil. **Microbial Cell Factories**, v. 14, n. 1, p. 14, 2015. Disponível em: <https://microbialcellfactories.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12934-015-0197-5>. Acesso em: 11 set. 2025.

HARIPRIYAN, U.; GOPINATH, K. P.; ARUN, J.; *et al.* Bioremediation of organic pollutants: a mini review on current and critical strategies for wastewater treatment. **Archives of Microbiology**, v. 204, n. 5, p. 286, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s00203-022-02907-9>. Acesso em: 29 ago. 2025.

IMAM, A.; KUMAR SUMAN, S.; KANAUIA, P. K.; *et al.* Biological machinery for polycyclic aromatic hydrocarbons degradation: A review. **Bioresource Technology**, v. 343, p. 126121, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852421014632>. Acesso em: 24 ago. 2025.

IQBAL, A.; ARSHAD, M.; KARTHIKEYAN, R.; *et al.* Diesel degrading bacterial endophytes with plant growth promoting potential isolated from a petroleum storage facility. **3 Biotech**, v. 9, n. 1, p. 35, 2019. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s13205-018-1561-z>. Acesso em: 23 ago. 2025.

ISHAYA, S.; USMAN, S.; NWEKE, O. D.; *et al.* Degradation of used engine oil by alcaligenes sp. strain isolated from oil contaminated site: Isolation, identification, and optimization of the growth parameters. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 8, p. 100516, 2023. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2666016423002219>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

ISLAM SAZZAD, M. R.; RAHMAN, M. M.; HASSAN, T.; *et al.* Advancing sustainable lubricating oil management: Re-refining techniques, market insights, innovative enhancements, and conversion to fuel. **Heliyon**, v. 10, n. 20, p. e39248, 2024. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405844024152796>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

JACOB, E. L.; MOHAN, A. P.; JOSEPH, A. V. Bioremediation of Petroleum-Polluted Soil Using Biosurfactant Producing Bacteria, *Pseudomonas sp.* **JOURNAL OF SCIENTIFIC RESEARCH**, v. 66, n. 01, p. 224–231, 2022. Disponível em: <https://www.bhu.ac.in/research_pub/jsr/Volumes/JSR_66_01_2022/24.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2025.

JACQUES, R. J. S.; BENTO, F. M.; ANTONIOLLI, Z. I.; *et al.* Biorremediação de solos contaminados com hidrocarbonetos aromáticos policíclicos. **Ciência Rural**, v. 37, n. 4, p. 1192–1201, 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010384782007000400049&lng=pt&tlng=pt>. Acesso em: 23 ago. 2025.

KARAS, M. A.; WDOWIAK-WRÓBEL, S.; SOKOŁOWSKI, W. Selection of Endophytic Strains for Enhanced Bacteria-Assisted Phytoremediation of Organic Pollutants Posing a Public Health Hazard. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 22, n. 17, p. 9557, 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1422-0067/22/17/9557>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

KARUNYA, A.; ROSE, C.; VALLI NACHIYAR, C. Biodegradation of the textile dye Mordant Black 17 (Calcon) by *Moraxella osloensis* isolated from textile effluent-contaminated site. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 30, n. 3, p. 915–924, 2014. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11274-013-1509-8>>. Acesso em: 25 set. 2025.

KHALAF, E. M.; RAIZADA, M. N. Taxonomic and functional diversity of cultured seed associated microbes of the cucurbit family. **BMC Microbiology**, v. 16, n. 1, p. 131, 2016. Disponível em: <<http://bmcmicrobiol.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12866-016-0743-2>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

KHAN, S.; AFZAL, M.; IQBAL, S.; *et al.* Plant–bacteria partnerships for the remediation of hydrocarbon contaminated soils. **Chemosphere**, v. 90, n. 4, p. 1317–1332, 2013. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045653512011861>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

KHANAFER, M.; AL-AWADHI, H.; RADWAN, S. Coliform Bacteria for Bioremediation of Waste Hydrocarbons. **BioMed Research International**, v. 2017, p. 1–8, 2017. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/bmri/2017/1838072/>>. Acesso em: 11 set. 2025.

KOJURI, M.; ARDESTANI, F. Isolation, identification and evaluation of oil hydrocarbon decomposing bacteria from contaminated areas of oil fields. **Advances in Environmental Technology**, v. 4, n. 3, jul. 2018. Disponível em: <https://aet.irost.ir/article_768_445c09662120c48b672a95d44d73cf0c.pdf>. Acesso em: 24 ago. 2025.

KRACMAROVA-FARREN, M.; PAPIK, J.; UHLIK, O.; *et al.* Compost, plants and endophytes versus metal contamination: choice of a restoration strategy steers the microbiome in polymetallic mine waste. **Environmental Microbiome**, v. 18, n. 1, p. 74, 2023. Disponível em: <<https://environmentalmicrobiome.biomedcentral.com/articles/10.1186/s40793-023-00528-3>>. Acesso em: 10 out. 2025.

KULANDHAIVEL, S. R.; MUTHURAMALINGAM, P.; SIVAPRAKASAM, B.; *et al.* In Silico Evaluation of Bioactive Compounds from *Cucumis anguria L.* as Potential Inhibitors of Antibiotic Resistant New Delhi Metallo- β -Lactamase (NDM-1). **ACS Omega**, v. 10, n. 22, p. 23684–23695, 2025. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.5c02627>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

KURNIA, D. R.; MANGUNWARDYO, W.; AMBARSARI, H. Biodegradation of used lubricant oil hydrocarbons using *Bacillus subtilis* InaCC B289 and *Pseudomonas aeruginosa* InaCC B290 in single or mixed cultures. In: AIP Conference Proceedings, v. 2021, n. 1, p. 070007, out. 2018. AIP Publishing LLC.

Disponível em: < <https://pubs.aip.org/aip/acp/article/2021/1/070007/724194/Biodegradation-of-used-lubricant-oil-hydrocarbons>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

KUSUMA, S. R.; SUTRISNO, S.; YULIYANTI, D.; RAHMAWATI, D.; SULISTYAWATI, R.; MURNIATI, S. Kinetics of Indigenous Isolated Bacteria *Bacillus mycoides* Used for Ex-Situ Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil in PT Pertamina Sungai Lilin South Sumatera. *Journal of Sustainable Development*, v. 2, n. 4, p. 1-10, 2009. Disponível em: <https://ccsenet.org/journal/index.php/jsd/article/view/4241>. Acesso em: 18 set. 2025.

LAFI, F.F.; ALAM, Intikhab; BISSELING, Ton; *et al.* Draft Genome Sequence of the Plant Growth–Promoting Rhizobacterium *Acinetobacter radioresistens* Strain SA188 Isolated from the Desert Plant *Indigofera argentea*. *Genome Announcements*, v. 5, n. 9, p. e01708-16, 2017. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5334585/>>. Acesso em: 10 set. 2025.

LALUCAT, J.; BENNASAR, A.; BOSCH, R.; *et al.* Biology of *Pseudomonas stutzeri*. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, v. 70, n. 2, p. 510–547, 2006. Disponível em: <<https://journals.asm.org/doi/10.1128/MMBR.00047-05>>. Acesso em: 20 set. 2025.

LI, Q.; LI, Y.; ZHU, L.; *et al.* Dependence of Plant Uptake and Diffusion of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on the Leaf Surface Morphology and Micro-structures of Cuticular Waxes. *Scientific Reports*, v. 7, n. 1, p. 46235, 2017. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/srep46235>>. Acesso em: 11 out. 2025.

LIMA, S. D.; OLIVEIRA, A. F.; GOLIN, R.; *et al.* Isolation and characterization of hydrocarbondegrading bacteria from gas station leaking-contaminated groundwater in the Southern Amazon, Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, v. 80, n. 2, p. 354–361, 2020. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1519-69842020000200354&tlng=en>. Acesso em: 24 ago. 2025.

LIU, L.; QUAN, S.; LI, L.; *et al.* Endophytic Bacteria Improve Bio- and Phytoremediation of Heavy Metals. *Microorganisms*, v. 12, n. 11, p. 2137, 2024. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/20762607/12/11/2137>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

LOPES, P. R. M. Biorremediação de solo contaminado com óleo lubrificante pela aplicação de diferentes soluções de surfactante químico e biosurfactante produzido por *Pseudomonas aeruginosa* LBI. 2014. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas – Microbiologia Aplicada) – Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Rio Claro, 2014. Disponível em: <<http://repositorio.unesp.br/handle/11449/110414>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

LUMACTUD, R.; SHEN, S. Y.; LAU, M.; *et al.* Bacterial Endophytes Isolated from Plants in Natural Oil Seep Soils with Chronic Hydrocarbon Contamination. *Frontiers in Microbiology*, v. 7, 2016. Disponível em: <<http://journal.frontiersin.org/Article/10.3389/fmicb.2016.00755/abstract>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

MA, Y.; RAJKUMAR, M.; ZHANG, C.; *et al.* Beneficial role of bacterial endophytes in heavy metal phytoremediation. *Journal of Environmental Management*, v. 174, p. 14–25, 2016. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479716300883>>. Acesso em: 29 ago. 2025.

MACAYA, C. C.; MÉNDEZ, V.; DURÁN, R. E.; *et al.* Complete Genome Sequence of HydrocarbonDegrading Halotolerant *Acinetobacter radioresistens* DD78, Isolated from the Aconcagua River Mouth in Central Chile. *Microbiology Resource Announcements*, v. 8, n. 33, p. e00601-19, 2019. Disponível em: <<https://journals.asm.org/doi/10.1128/MRA.00601-19>>. Acesso em: 10 set. 2025.

MAMETJA, N. M.; RAMADWA, T. E.; MANAGA, M.; *et al.* Recent Advances and Developments in Bacterial Endophyte Identification and Application: A 20-Year Landscape Review. **Plants**, v. 14, n. 16, p. 2506, 2025. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2223-7747/14/16/2506>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

MARCHUT-MIKOLAJCZYK, O.; DROŻDŻYŃSKI, P.; PIETRZYK, D.; *et al.* Biosurfactant production and hydrocarbon degradation activity of endophytic bacteria isolated from *Chelidonium majus* L. **Microbial Cell Factories**, v. 17, n. 1, p. 171, 2018. Disponível em: <<https://microbialcellfactories.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12934-018-1017-5>>. Acesso em: 24 ago. 2025.

MARCOS, J. F. Fisiologia de sementes de plantas cultivadas. 2. ed. Londrina: ABRATES, 2015.

MARIANO, A. P.; BONOTTO, D. M.; DE FRANCESCHI DE ANGELIS, D.; *et al.* Biodegradability of commercial and weathered diesel oils. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 39, n. 1, p. 133–142, 2008. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3768377/>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

MATILDA, M. I.; SAMUEL, H. S. Bioremediation of oil spill: concept, methods and applications. **Discover Chemistry**, v. 1, n. 1, p. 42, 2024. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/s44371024-00038-2>>. Acesso em: 24 ago. 2025.

MEKONNEN, B. A.; ARAGAW, T. A.; GENET, M. B. Bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil: a review on principles, degradation mechanisms, and advancements. **Frontiers in Environmental Science**, v. 12, p. 1354422, 2024. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2024.1354422/full>>. Acesso em: 29 ago. 2025.

MEUDEEC, A.; DUSSAUZE, J.; DESLANDES, E.; *et al.* Evidence for bioaccumulation of PAHs within internal shoot tissues by a halophytic plant artificially exposed to petroleum-polluted sediments. **Chemosphere**, v. 65, n. 3, p. 474–481, 2006. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045653506001196>>. Acesso em: 2 out. 2025.

MODOLO, V. A. e COSTA, Cyro Paulino da. **Maxixe: uma hortaliça de tripla forma de consumo**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. 2003. Disponível em: <<https://www.esalq.usp.br/biblioteca/file/158/download?token=kwKq7So6>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

MOLINA, L.; SEGURA, A. Biochemical and Metabolic Plant Responses toward Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals Present in Atmospheric Pollution. **Plants**, v. 10, n. 11, p. 2305, 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2223-7747/10/11/2305>>. Acesso em: 10 out. 2025.

MUKHERJEE A, CHETTRI B, LANGPOKLAKPAM JS, SINGH AK, CHATTOPADHYAY D. Draft Genome Sequence of Hydrocarbon-Degrading *Enterobacter cloacae* Strain S1:CND1, Isolated from Crude Oil-Contaminated Soil from the Noonmati Oil Refinery, Guwahati, Assam, India. **Genome Announc.** 2016 May 12;4(3):e00367-16. doi: 10.1128/genomeA.00367-16. PMID: 27174279; PMCID: PMC4866856.

MURTHY, N; DEWIR, H; DALAWAI, D; *et al.* Comparative physicochemical analysis of seed oils of wild cucumber (*Cucumis sativus* var. *hardwickii* (Royle) Alef.), cucumber (*Cucumis sativus* L. var. *sativus*), and gherkin (*Cucumis anguria* L.). **South African Journal of Botany**, v. 145, p. 186–191, 2022. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S025462992100212X>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

MURTI SUJADI, F.; YAHYA, Y.; KURNIAWAN, A.; *et al.* Lubricant Oil Bioremediation by Rhodococcus erythropolis Bacteria and Indigenous Bacteria Isolated from Water Contaminated with Lubricant Oil. **Research Journal of Life Science**, v. 7, n. 1, p. 62–74, 2020. Disponível em: <<https://rjls.ub.ac.id/index.php/rjls/article/view/296>>. Acesso em: 12 set. 2025.

MUSHTAQ, S.; SHAFIQ, M.; TARIQ, M. R.; *et al.* Interaction between bacterial endophytes and host plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1092105, 2023. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2022.1092105/full>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

MUTHUSAMY PANDIAN, T.; ESAKKIMUTHU, R.; RANGASAMY, A.; *et al.* Exploring the Potential of Bacterial Endophytes in Plant Disease Management. **Current Microbiology**, v. 81, n. 12, p. 403, 2024. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/s00284-024-03918-z>>. Acesso em: 29 ago. 2025.

NIE, M.; WANG, Y.; YU, J.; *et al.* Understanding Plant-Microbe Interactions for Phytoremediation of Petroleum-Polluted Soil. **PLoS ONE**, v. 6, n. 3, p. e17961, 2011. Disponível em: <<https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0017961>>. Acesso em: 24 ago. 2025.

NISAR, N.; FAREED, A.; NAQVI, S. T. A.; *et al.* Biodegradation Study of Used Engine Oil by Free and Immobilized Cells of the *Pseudomonas oleovorans* Strain NMA and Their Growth Kinetics. **ACS Omega**, v. 10, n. 1, p. 541–549, 2025. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.4c06964>>. Acesso em: 12 set. 2025.

NOWAK, P.; KUCHARSKA, K.; KAMIŃSKI, M. Ecological and Health Effects of Lubricant Oils Emitted into the Environment. **International Journal of Environmental Research and Public Health**,

v. 16, n. 16, p. 3002, 2019. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1660-4601/16/16/3002>>. Acesso em: 24 ago. 2025.

OBOT, U. R.; *et al.* Heterotrophic activity and hydrocarbon degradation in crude oil contaminated coastal soil augmented with indigenous biosurfactant producing *Pseudomonas sp.* **Journal of Materials & Environmental Sustainability Research**, Uyo, v. 4, n. 2, p. 47–59, ago. 2024. DOI: 10.55455/jmesr.2024.008. Disponível em: <<https://jmesr.iceesr.org.ng/publications/24/08/heterotrophicactivity-and-hydrocarbon-degradation-in-crude-oil-contaminated-coastal-soil-augmented-withindigenous-biosurfactant-producing-pseudomonas-sp/>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

OLOWOMOFE, T. O.; OLUYEGE, J. O.; ADERIYE, B. I.; *et al.* Degradation of poly aromatic fractions of crude oil and detection of catabolic genes in hydrocarbon-degrading bacteria isolated from Agbabu bitumen sediments in Ondo State. **AIMS Microbiology**, v. 5, n. 4, p. 308–323, 2019. Disponível em: <<http://www.aimspress.com/article/doi/10.3934/microbiol.2019.4.308>>. Acesso em: 11 set. 2025.

OLOWOMOFE, T.; OLUYEGE, J.; SOWOLE, D. Isolation, Screening and Characterization of Hydrocarbon-Utilizing Bacteria Isolated from Bitumen-Contaminated Surface Water in Agbabu, Ondo State. **Journal of Advances in Biology & Biotechnology**, v. 15, n. 2, p. 1–9, 2017. Disponível em: <<https://journaljabb.com/index.php/JABB/article/view/70>>. Acesso em: 12 set. 2025.

ONBASILI, D.; ASLIM, B.; CELIK, G. Y. Investigation of Metabolite Productions and Degradation of Hazardous Organic Pollutants by *Pseudomonas spp.* **Journal of Applied Biological Sciences**, v. 5, n. 2, p. 9–14, 2011. Disponível em: <<https://dergipark.org.tr/en/pub/jabs/issue/34916/387276>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

PALITTAPONGARNPIM, M.; POKETHITIYOOK, P.; UPATHAM, E. S.; TANGBANLUEKAL, L. Biodegradation of crude oil by soil microorganisms in the tropic. **Biodegradation**, v. 9, n. 2, p. 83–90, 1998. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9821254/>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

PAWLIK, M.; CANIA, B.; THIJS, S.; *et al.* Hydrocarbon degradation potential and plant growthpromoting activity of culturable endophytic bacteria of *Lotus corniculatus* and *Oenothera biennis* from a long-term polluted site. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 24, p. 19640–19652, 2017. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11356-017-9496-1>>. Acesso em: 24 ago. 2025.

QI, Q.; HU, C.; LIN, J.; *et al.* Contamination with multiple heavy metals decreases microbial diversity and favors generalists as the keystones in microbial occurrence networks. **Environmental Pollution**, v. 306, p. 119406, 2022. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0269749122006200>>. Acesso em: 10 out. 2025.

QIAO, Y.; XU, J.; WU, Y.; *et al.* Advancements in Functional Endophytic Bacterium-Assisted Phytoremediation of PHC-Contaminated Soils: A Review. **Processes**, v. 13, n. 9, p. 2954, 2025. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2227-9717/13/9/2954>>. Acesso em: 30 set. 2025.

RACHE-ARCE, D. C.; MACHACADO-SALAS, M.; ROSERO-GARCÍA, D. Hydrocarbon-degrading bacteria in Colombia: systematic review. **Biodegradation**, v. 33, n. 2, p. 99–116, 2022. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/s10532-022-09976-z>>. Acesso em: 30 set. 2025.

RYAN, R. P.; GERMAINE, K.; FRANKS, A.; *et al.* Bacterial endophytes: recent developments and applications. **FEMS Microbiology Letters**, v. 278, n. 1, p. 1–9, 2008. Disponível em: <<https://academic.oup.com/femsle/article-lookup/doi/10.1111/j.1574-6968.2007.00918.x>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

SALAM, L. B. Metabolism of waste engine oil by *Pseudomonas* species. **3 Biotech**, v. 6, n. 1, p. 98, 2016. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s13205-016-0419-5>>. Acesso em: 12 set. 2025.

SALFINGER, Y.; TORTORELLO, M. L. **Compendium of methods for the microbiological examination of foods**. 5. ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, 2015. p. 83.

SAMPAIO, C. J. S. **Estudos de fitorremediação de solos contaminados com diesel utilizando *Rhizophora mangle L.* e rizobactérias promotoras do crescimento de plantas**. 2015. Dissertação

(Mestrado em Biotecnologia) – Instituto de Ciências da Saúde, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015. Orientação de: BAHiense, Thiago Campanharo; Co-Orientação de: ROQUE, Milton Ricardo de Abreu. Disponível em: <<https://repositorio.ufba.br/handle/ri/23512>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

SÁNCHEZ-ALVARRACÍN, C.; CRIOLLO-BRAVO, J.; ALBUJA-ARIAS, D.; *et al.* Characterization of Used Lubricant Oil in a Latin-American Medium-Size City and Analysis of Options for Its Regeneration. **Recycling**, v. 6, n. 1, p. 10, 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2313-4321/6/1/10>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

SANTOS, A. D. S.; MORENO, T. F.; CAVALCANTE, L. C. V.; *et al.* Estudo do processo de biorremediação em solos impactados por derramamento de petróleo. **Diversitas Journal**, v. 6, n. 1, p. 823–835, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ifal.edu.br/diversitas_journal/article/view/1685>. Acesso em: 23 ago. 2025.

SANTOS, F. P. B. dos. **Produção de biossurfatante por *Pseudomonas aeruginosa* EQ 109 a partir de glicerol**. 2011. 122 f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

SANTOS, R. R. dos; JUNIOR, Euvaldo de Sousa Costa. O óleo lubrificante usado e contaminado infere na infiltração de água no solo. **AGROPECUÁRIA CIENTÍFICA NO SEMIÁRIDO**, v. 21, n. 1, p. 60–64, 2025. Disponível em: <<https://www.acsa.revistas.ufcg.edu.br/acsa/index.php/ACSA/article/view/1445>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

SCHMID, P. J.; MAITZ, S.; KITTINGER, C. *Bacillus cereus* in Packaging Material: Molecular and Phenotypical Diversity Revealed. **Frontiers in Microbiology**, v. 12, p. 698974, 2021. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2021.698974/full>>. Acesso em: 21 set. 2025.

SHARMA, A. *et al.* Biodegradation of acrylamide by a newly isolated *Moraxella osloensis* strain and characterization of its amidase. **Biodegradation**, v. 20, p. 861–869, 2009. DOI: 10.1007/s10532-0099270-4.

SHI, L.; LIU, Z.; YANG, L.; *et al.* Effects of oil pollution on soil microbial diversity in the Loess hilly areas, China. **Annals of Microbiology**, v. 72, n. 1, p. 26, 2022. Disponível em: <<https://annalsmicrobiology.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13213-022-01683-7>>. Acesso em: 10 out. 2025.

SICILIANO, S. D.; FORTIN, N.; MIHOC, A.; *et al.* Selection of Specific Endophytic Bacterial Genotypes by Plants in Response to Soil Contamination. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 67, n. 6, p. 2469–2475, 2001. Disponível em: <<https://journals.asm.org/doi/10.1128/AEM.67.6.2469-2475.2001>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

SIDDIQUI, Z.; GROHMANN, E.; MALIK, A. Degradation of alkane hydrocarbons by *Priestia megaterium* ZS16 and sediments consortia with special reference to toxicity and oxidative stress induced by the sediments in the vicinity of an oil refinery. **Chemosphere**, v. 317, p. 137886, mar. 2023. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.137886. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137886>. Acesso em: 23 ago. 2025.

SILVA DA, E. M.; SANTOS MAGALHÃES, Cledson dos; RANDAU, K. P. Descrição botânica, usos etnomedicinais, fitoquímica e atividades farmacológicas de espécies do gênero *Cucumis* L.: Uma revisão. **Diversitas Journal**, v. 8, n. 3, 2023. Disponível em: <https://diversitasjournal.com.br/diversitas_journal/article/view/2536>. Acesso em: 23 ago. 2025.

SILVA, E. de S. **Quantificação de bactérias endofíticas em plantas de sisal utilizando PCR em tempo real**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Biologia) – Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2012. Disponível em: <<http://ri.ufrb.edu.br/jspui/handle/123456789/2371>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

SILVA, M. de O.; FREIRE, F. J.; LIRA JUNIOR, M. A.; *et al.* Isolamento e prospecção de bactérias endofíticas e epifíticas na cana-de-açúcar em áreas com e sem cupinizada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 4, p. 1113–1122, 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832012000400006&lng=pt&tlng=pt>. Acesso em: 23 ago. 2025.

SIMMER, R. A.; SCHNOOR, J. L. Phytoremediation, Bioaugmentation, and the Plant Microbiome. **Environmental Science & Technology**, v. 56, n. 23, p. 16602–16610, 2022. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.2c05970>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

SOUZA, A. M. de. **Fitorremediação de solos contaminados com óleos lubrificantes usados**. 2009. 144 f. Dissertação (Mestrado em Química ambiental; Polímeros), Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://www.bdt.d.uerj.br:8443/bitstream/1/15818/1/Dissertacao%20andressa%20moreira%20souza.pdf>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

SUI, X.; WANG, X.; YU, L.; *et al.* Genomics for the characterization of the mechanisms of microbial strains in degrading petroleum pollutants. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 8, p. 21608–21618, 2022. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/s11356-022-23685-3>>. Acesso em: 30 set. 2025.

TAGHAVI, S.; BARAC, T.; GREENBERG, B.; *et al.* Horizontal Gene Transfer to Endogenous Endophytic Bacteria from Poplar Improves Phytoremediation of Toluene. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 71, n. 12, p. 8500–8505, 2005. Disponível em: <<https://journals.asm.org/doi/10.1128/AEM.71.12.8500-8505.2005>>. Acesso em: 24 ago. 2025.

TALESHPUR, S.; TAGHAVI, L.; FARAHANI, H. F.; *et al.* Oil pollution removal using g-C3N4/PEG nanocomposite in the presence of bacterial consortium isolated from contaminated areas: optimization Study. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 22, n. 9, p. 7533–7550, 2025. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/s13762-024-06307-y>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

TAMADA, I. S.; LOPES, P. R. M.; MONTAGNOLLI, R. N.; *et al.* Biodegradation and toxicological evaluation of lubricant oils. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 55, n. 6, p. 951–956, 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S151689132012000600020&lng=en&tlng=en>. Acesso em: 23 ago. 2025.

TARIGHOLIZADEH, S.; SUSHKOVA, S.; RAJPUT, V. D.; *et al.* Transfer and Degradation of PAHs in the Soil–Plant System: A Review. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 72, n. 1, p. 46–64, 2024. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jafc.3c05589>>. Acesso em: 11 out. 2025.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.

TSHISHONGA, K.; SEREPA-DLAMINI, M. H. Draft Genome Sequence of *Enterobacter hormaechei* Strain MHSD6, a Plant Endophyte Isolated from Medicinal Plant *Pellaea calomelanos*. **Microbiology Resource Announcements**, v. 8, n. 48, p. e01251-19, 2019. Disponível em: <<https://journals.asm.org/doi/10.1128/MRA.01251-19>>. Acesso em: 11 set. 2025.

TUHULOULA, A.; SUPRAPTO, S.; ALTWAY, A.; *et al.* Biodegradation of Extractable Petroleum Hydrocarbons by Consortia *Bacillus cereus* and *Pseudomonas putida* in Petroleum Contaminated-Soil. **Indonesian Journal of Chemistry**, v. 19, n. 2, p. 347, 2019. Disponível em: <<https://jurnal.ugm.ac.id/ijc/article/view/33765>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

UMAR, H.; UMAR, A.; UJAH, U. J. *et al.* Biodegradation of waste lubricating oil by bacteria isolated from the soil. **IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology**, v. 3, n. 6, p. 32–37, may-jun. 2013. Disponível em: <<https://www.iosrjournals.org/iosr-jestft/papers/vol3issue6/E0363237.pdf>>. Acesso em: 23 ago. 2025. UNITED STATES. **Food and Drug Administration. Bacteriological Analytical Manual**. 6. ed. Washington, DC: FDA, 1984.

VIANA, T. F. C. **Isolamento, caracterização morfológica e molecular de bactérias endofíticas e epifíticas em espécies de Bromeliaceae de bancadas lateríticas**, Corumbá, Mato Grosso do Sul. 2016. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Corumbá, 2016. Orientação de: PAGGI, Gecele Matos; BRASIL, Marivaine da Silva. Disponível em: <<https://ri.ufrb.edu.br/jspui/handle/123456789/2371>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

VIEIRA, B. R.; SARROUH, B.; LOFRANO, R. C. Z.. Use of *Pseudomonas fluorescens* isolated from the Serra de Ouro Branco State Park/Minas Gerais - Brazil in the biodegradation of residual automotive lubricating oils. **Ciência e Natura**, v. 46, 2024. Disponível em:

<<https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/84868>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

VIEIRA, F. C. S.; NAHAS, E. Quantificação de bactérias totais e esporuladas no solo. **Scientia Agricola**, v. 57, n. 3, p. 539–545, 2000. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162000000300026&lng=pt&tlng=pt>. Acesso em: 23 ago. 2025.

WONGSA, P.; TANAKA, M.; UENO, A.; *et al.* Isolation and Characterization of Novel Strains of *Pseudomonas aeruginosa* and *Serratia marcescens* Possessing High Efficiency to Degrade Gasoline, Kerosene, Diesel Oil, and Lubricating Oil. **Current Microbiology**, v. 49, n. 6, p. 415–422, 2004. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00284-004-4347-y>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

WU, T.; XU, J.; LIU, J.; *et al.* Characterization and Initial Application of Endophytic *Bacillus safensis* Strain ZY16 for Improving Phytoremediation of Oil-Contaminated Saline Soils. **Frontiers in Microbiology**, v. 10, p. 991, 2019. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmicb.2019.00991/full>>. Acesso em: 12 set. 2025.

YAN, Q.; MING, Y.; LIU, J.; *et al.* Microbial biotechnology: from synthetic biology to synthetic ecology. **Advanced Biotechnology**, v. 3, n. 1, p. 1, s44307-024-00054–4, 2025. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/s44307-024-00054-4>>. Acesso em: 29 ago. 2025.

YING, X.; YANG, X.; LV, J.; *et al.* Study on a Strain of *Lysinibacillus sp.* with the Potential to Improve the Quality of Oil Sands. **ACS Omega**, v. 7, n. 14, p. 11654–11663, 2022. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.1c06451>>. Acesso em: 20 set. 2025.

YOUSAF, S.; RIPKA, K.; REICHENAUER, T.G.; *et al.* Hydrocarbon degradation and plant colonization by selected bacterial strains isolated from Italian ryegrass and birdsfoot trefoil: Bacterial hydrocarbon degradation and plant colonization. **Journal of Applied Microbiology**, v. 109, n. 4, p. 1389–1401, 2010. Disponível em: <<https://academic.oup.com/jambio/article/109/4/1389/6720713>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

YOUSAF, S.; AFZAL, M.; REICHENAUER, T. G.; *et al.* Hydrocarbon degradation, plant colonization and gene expression of alkane degradation genes by endophytic *Enterobacter ludwigii* strains. **Environmental Pollution**, v. 159, n. 10, p. 2675–2683, 2011. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0269749111003186>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

ZAREI, M.; EBADI, K.; SANATI, A. M. Optimization of Crude Oil Biodegradation by *Brevibacterium sp.* Isolated from the Native Sponges of the Persian Gulf. **Iranian Journal of Biotechnology**, v. 19, n. 2, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.30498/IJB.2021.2690>>. Acesso em: 21 set. 2025.

ZHONG, M.; YANG, C.; SU, L.; *et al.* Interactions between plants and bacterial communities for phytoremediation of petroleum-contaminated soil. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, n. 25, p. 37564–37573, 2024. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/s11356-024-336672>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

ZUCARELI, C.; CAVARIANI, C.; PORTUGAL, G.; *et al.* Potencial fisiológico de sementes de milho hidratadas pelo método do substrato de papel toalha. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 30, n. 3, p. 122–129, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010131222008000300016&lng=pt&tlng=pt>. Acesso em: 7 set. 2025.