



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA
MESTRADO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA

KALINE SOARES DA SILVA

**SELEÇÃO DE ESPÉCIES FORRAGEIRAS PARA PROGRAMAS DE
REMEDIÇÃO DE DERIVADOS DE PETRÓLEO NO SOLO**

MOSSORÓ

2023

KALINE SOARES DA SILVA

**SELEÇÃO DE ESPÉCIES FORRAGEIRAS PARA PROGRAMAS DE
REMEDIAÇÃO DE DERIVADOS DE PETRÓLEO NO SOLO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Tratamento e uso agrícola de resíduos e seus impactos no solo e água

Orientador: Daniel Valadão Silva, Prof. Dr.

Co-orientadora: Ruza Gabriela Medeiros de Araujo Macedo, Profa. Dra.

MOSSORÓ

2023

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

SS586 Silva, Kaline Soares.
SELEÇÃO DE ESPÉCIES FORRAGEIRAS PARA PROGRAMAS
DE REMEDIAÇÃO DE DERIVADOS DE PETRÓLEO NO SOLO /
Kaline Soares Silva. - 2023.
56 f. : il.

Orientador: Daniel Valadão Silva.
Coorientador: Ruza Gabriela Macedo.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Manejo de Solo e Água, 2023.

1. Impactos ambientais. 2. Poluentes orgânicos.
3. Recuperação do solo. I. Silva, Daniel Valadão,
orient. II. Macedo, Ruza Gabriela, co-orient.
III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo autor(a).

Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência

Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva

CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

KALINE SOARES DA SILVA

**SELEÇÃO DE ESPÉCIES FORRAGEIRAS PARA PROGRAMAS DE
REMEDIAÇÃO DE DERIVADOS DE PETRÓLEO NO SOLO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Tratamento e uso agrícola de resíduos e seus impactos no solo e água

Defendida em: 31 / 08 / 2023.

BANCA EXAMINADORA

Daniel Valadão Silva, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Ruza Gabriela Medeiros de Araújo Macedo, Profa. Dra. (UFERSA)
Membro Examinador

Fernando Sarmento de Oliveira, Prof. Dr. (CENTEC)
Membro Examinador

Ana Beatriz Rocha de Jesus Passos, Profa. Dra. (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus e ao Universo por me guiarem, protegerem e abençoarem com paciência e sabedoria.

Agradeço ao meu esposo Abhner Ximenes por todo amor, companheirismo e apoio.

Grata a minha mãe Kedima Xavier e à minha irmã Kirley Soares por todos os conselhos, votos de coragem, amor e cuidado.

Ao meu orientador Dr. Daniel Valadão Silva, que me incentivou e acreditou junto comigo neste trabalho. Serei sempre grata pela compreensão e paciência em todo o processo.

Agradeço ao Dr. Bruno Caio Chaves Fernandes, Dr. Paulo das Chagas Fernandes e a Professora Dra Márcia Michelle de Queiroz Ambrosio por todos apoios e auxílio no desenvolvimento das análises dessa pesquisa.

A toda equipe NOMATO minha eterna gratidão, em especial Cydianne Cavalcante, Maria Carolina, Daniele Amâncio, Jesley Nogueira, Luma Lorena, Lucrécia Pacheco, Mayara Alana e Yansen Maxwell e aos estagiários. Sem vocês este trabalho não seria possível.

Ao Programa de Recursos Humanos- PRH 55.1 e Gestão FINEP pela concessão da bolsa de estudos e ao Professor Dr. Frederico do Carmo, Dr. Fábio Fagundes e Dra. Ruza Macedo por acreditarem e confiarem no meu trabalho.

Aos membros desta banca pelas contribuições para o aperfeiçoamento deste trabalho.

Por fim, agradeço à Universidade Federal Rural do Semi-Árido e ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e água.

Uma benção é para que você se lembre totalmente de quem é, e faça bom uso da sua magnitude que nasceu embutida no seu eu precioso e indomável.

Clarissa Pinkola Estés

RESUMO

A presença de derivados de petróleo no solo implica uma série de ameaças ao meio ambiente e à saúde humana. A ameaça aos ecossistemas reflete a preocupação governamental com a recuperação das áreas degradadas pelo processo de produção, extração ou transporte do óleo, destacando a necessidade urgente de medidas eficazes para mitigar esses impactos adversos. Nesta pesquisa foram avaliadas a tolerância de espécies forrageiras a contaminantes da indústria do petróleo visando o uso destas espécies em programas de remediação. Os experimentos foram realizados em casa de vegetação na Universidade Federal Rural do Semi-Árido. As espécies avaliadas foram: *Pennisetum glaucum*, *Zea mays*, *Brachiaria ruziziensis*, *Panicum maximum* e *Sorghum bicolor*. Na primeira pesquisa foram avaliadas a tolerância das espécies aos seguintes contaminantes: benzeno, xileno e tolueno. Na segunda foram avaliadas a tolerância das mesmas espécies ao óleo diesel adicionado ao solo em duas concentrações: 500 e 1000 mg kg⁻¹. Foram realizadas análises morfológicas, clorofilas, carotenoides, açúcares solúveis totais e quantificação microbiológica. Os resultados obtidos das análises realizadas comprovaram que a tolerância das espécies dependeu do poluente presente no solo. As espécies *Z. mays*, *B. ruziziensis* e *P. maximum* demonstraram respectivamente maior potencial para uso em programas de remediação em ambientes com compostos orgânicos voláteis. Para a remediação de ambientes com resíduos de óleo diesel as espécies com maior potencial foram o *S. bicolor* e *P. maximum*. As espécies estudadas demonstram maior tolerância ao benzeno e tolueno. *Z. mays*, *B. ruziziensis*, *P. maximum* e *S. bicolor* são as espécies com maior potencial para estudos de remediação de contaminantes como óleo diesel e benzeno, tolueno e xileno.

Palavras-chave: Impactos ambientais, Poluentes orgânicos, Recuperação do solo

ABSTRACT

The presence of oil derivatives in soil poses significant threats to both the environment and human health. Emanating from the government's concern for the recovery of areas degraded by oil production, extraction, or transportation, there is a pressing need for effective measures to mitigate these adverse impacts on ecosystems. This research aimed to assess the tolerance of forage species to contaminants from the oil industry, with the goal of utilizing these species in remediation programs. Conducted at the Federal Rural University of the Semi-Arid in a greenhouse, the experiments focused on five species: *Pennisetum glaucum*, *Zea mays*, *Brachiaria ruziziensis*, *Panicum maximum*, and *Sorghum bicolor*. The first study evaluated the species' tolerance to benzene, xylene, and toluene, while the second assessed their tolerance to diesel oil at concentrations of 500 and 1000 mg kg⁻¹ in the soil. The assessments included morphological analyses, chlorophylls, carotenoids, total soluble sugars, and microbiological quantification. The results revealed that the species' tolerance depended on the specific pollutant present in the soil. *Zea mays*, *Brachiaria ruziziensis*, and *Panicum maximum* exhibited the highest potential for remediation programs in environments containing volatile organic compounds. In environments with diesel oil residues, *Sorghum bicolor* and *Panicum maximum* demonstrated the greatest potential. The studied species exhibited greater tolerance to benzene and toluene. Therefore, *Zea mays*, *Brachiaria ruziziensis*, *Panicum maximum*, and *Sorghum bicolor* are identified as species with significant potential for studies on the remediation of contaminants such as diesel oil, benzene, toluene, and xylene.

Keywords: Environmental impacts, Organic pollutants, Soil recovery

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

- Figura 1** Área foliar (A) e radicular (B) de espécies forrageiras submetidas a contaminação do solo com tolueno, benzeno, xileno..... 13
- Figura 2** Matéria seca total de espécies forrageiras submetidas a contaminação do solo com tolueno, benzeno, xileno..... 14
- Figura 3** Teor de clorofila a (A) e b (B) de espécies forrageiras submetidas a contaminação do solo com tolueno, benzeno, xileno..... 15
- Figura 4** Teor de clorofila total (A) e carotenoides (B) de espécies forrageiras submetidas a contaminação do solo com tolueno, benzeno, xileno..... 16

CAPÍTULO 2

- Figura 1** Área foliar (A) e radicular (B) das espécies forrageiras submetidas a contaminação por óleo diesel..... 33
- Figura 2** Matéria seca total de espécies forrageiras submetidas a solos contaminados por óleo diesel. 34
- Figura 3** Teor de clorofila a (A) e clorofila b (B) de espécies forrageiras submetidas a solo contaminado por óleo diesel..... 35
- Figura 4** Teor de clorofila total (A) e carotenoides (B) de espécies forrageiras submetidas a solo contaminado por óleo diesel..... 36

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

| | |
|--|----|
| Tabela 1 Análise química e física do solo utilizado no experimento | 9 |
| Tabela 2 Quantidade de açúcares solúveis totais (g) em espécies forrageiras cultivadas em solo com tolueno, benzeno e xileno..... | 17 |
| Tabela 3 Quantificação de unidades formadoras de colônias (UFC) de bactérias totais ($\times 10^5$ UFCg ⁻¹ solo) em solo contaminado por tolueno, benzeno e xileno..... | 18 |
| Tabela 4 Quantificação de UFC's de bactérias esporulantes ($\times 10^5$, UFCg ⁻¹ solo) em solo contaminado por tolueno, benzeno e xileno..... | 18 |
| Tabela 5 Número de fungos totais ($\times 10^{-3}$, UFC g ⁻¹ solo) em solo contaminado por tolueno, benzeno e xileno. | 20 |

CAPÍTULO 2

| | |
|--|----|
| Tabela 1 Análise química e física do solo utilizado no experimento..... | 30 |
| Tabela 2 Quantidade de açúcares solúveis totais (g) em espécies forrageiras cultivadas em solos com óleo diesel. | 37 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-----|--|
| Abs | Absorbância |
| CTC | Capacidade de troca catiônica |
| CE | Condutividade elétrica |
| MS | Matéria Seca |
| NPK | Formulação química nitrogênio, fósforo e potássio |
| ppm | Partes por milhão |
| pH | Potencial de hidrogênio |
| PST | Porcentagem de saturação de sódio trocável no solo |
| SB | Soma de bases |
| T | Total de cargas negativas do solo |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|----------------------|--|
| Al^{+3} | Cátion de alumínio |
| C4 | Metabolismo |
| Ca^{+2} | Cátion de cálcio |
| cm | Centímetros |
| cmolc.dm^3 | Centimol de carga por decímetro cúbico |
| dm^3 | decímetros cúbicos |
| G | Gramma |
| g kg^{-1} | Gramma por quilograma |
| H+Al | Acidez potencial |
| H_2O | Água |
| K^{+} | Cátion de potássio |
| kg kg^{-1} | Quilograma por quilograma |
| M | Saturação por alumínio |
| mg kg^{-1} | Miligrama por quilograma |
| mg dm^3 | Miligrama por decímetro cúbico |
| mg kg^{-1} | Miligrama por quilograma |
| mg L^{-1} | Miligrama por litro |
| mg mL^{-1} | Miligrama por mililitro |
| mL | Mililitros |
| Na^{+} | Cátion de Sódio |
| N | Nitrogênio |
| nm | Nanômetros |
| P | Fósforo |
| V | Saturação por base |
| % | Porcentagem |
| ± | Mais ou menos |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| INTRODUÇÃO GERAL | 1 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 3 |
| CAPÍTULO 1 | 6 |
| IMPACTO DA CONTAMINAÇÃO NO SOLO POR TOLUENO, BENZENO E XILENO NO CRESCIMENTO DE ESPÉCIES FORRAGEIRAS E NOS INDICADORES MICROBIOLÓGICOS DO SOLO | 6 |
| RESUMO | 6 |
| CHAPTER 1 | 7 |
| IMPACT OF TOLUENE, BENZENE AND XYLENE CONTAMINATION IN THE SOIL ON FORAGGE SPECIES GROWTH AND BIOLOGICAL INDICATORS | 7 |
| ABSTRACT | 7 |
| 1. INTRODUÇÃO | 8 |
| 2. MATERIAL E MÉTODOS | 9 |
| 2.1 Local do experimento e condições experimentais..... | 9 |
| 2.2 Crescimento das plantas..... | 10 |
| 2.3 Conteúdo de açúcares, clorofilas e carotenoides..... | 10 |
| 2.4 Análises microbiológicas | 11 |
| 2.5 Análises Estatísticas | 12 |
| 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 12 |
| 3.1 Análises de crescimento..... | 12 |
| 3.2 Análises de açúcares solúveis totais, clorofilas e carotenoides..... | 15 |
| 3.4 Indicadores Microbiológicos..... | 18 |
| 4. CONCLUSÕES | 21 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 22 |
| CÁPITULO 2 | 27 |
| POTENCIAL DE ESPÉCIES FORRAGEIRAS PARA REMEDIAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS COM ÓLEO DIESEL | 27 |

| | |
|--|-----------|
| RESUMO | 27 |
| CHAPTER 2..... | 28 |
| POTENTIAL OF FORAGE SPECIES FOR REMEDIATION OF SOILS CONTAMINATED WITH DIESEL OIL | 28 |
| ABSTRACT | 28 |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 29 |
| 2. MATERIAL E MÉTODOS | 30 |
| 2.1 Local do experimento e condições experimentais..... | 30 |
| 2.2 Crescimento das plantas..... | 31 |
| 2.3 Conteúdo de açúcares, clorofilas e carotenoides..... | 31 |
| 2.4 Análises Estatísticas | 32 |
| 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 32 |
| 3.1 Análises de crescimento | 32 |
| 3.2 Análise dos açúcares solúveis totais, clorofilas e carotenoides | 34 |
| 4. CONCLUSÕES..... | 37 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 38 |
| CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 41 |

INTRODUÇÃO GERAL

A crescente demanda populacional por energia refletiu no aumento do uso do petróleo e seus derivados visando atender à necessidade mundial. A indústria petrolífera se destaca desde o início do século XX por ter sido o principal motor econômico do mundo moderno e desde então é inevitável nas atividades dessa indústria a geração de resíduos que precisam ser gerenciados (JAGABA et al., 2022).

O processo de extração, refino e transporte do petróleo contribuem para a contaminação do meio ambiente, visto que, possuem uma complexa mistura de hidrocarbonetos, como os aromáticos policíclicos, alguns listados como substâncias com efeitos cancerígenos (DENG et al., 2016). O IBAMA afirmou que a exploração e produção de petróleo e gás offshore produziram 44.437 toneladas de resíduos sólidos em 2009, sendo os principais resíduos oleosos, meta e resíduos não passíveis de reciclagem (IBAMA, 2011).

O descarte de resíduos da indústria petrolífera, derramamentos de óleo, perfuração de poços e rupturas de dutos são as causas predominantes de contaminação com efeitos negativos sobre plantas, animais, humanos e meio ambiente (ABDULLAH, 2020). A persistência e toxicidade dos hidrocarbonetos de petróleo no solo têm gerado uma preocupação por parte dos órgãos ambientais e levado a investigações para removê-los (LIAO et al., 2016).

A contaminação por hidrocarbonetos é rapidamente identificada no solo e em águas subterrâneas, principalmente nas áreas de produção e oleodutos (COLLINS, 2007). A alta estabilidade dos hidrocarbonetos no solo pode interferir diretamente no desenvolvimento normal das plantas e causar alterações microbiológicas (ADAM et al., 1999).

Ao se confirmar a contaminação do solo e água, técnicas para a recuperação da área degradada são necessárias e estão previstas na Lei nº 6.938 de 31 de agosto de 1981, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente que impõe ao poluidor a obrigação de recuperar e/ou indenizar os danos causados. A recuperação da área é definida de acordo com as características das fontes poluidoras e visa a remoção ou redução das concentrações do contaminante.

Os métodos mais comuns de remediação são procedimentos físicos ou químicos que em sua maioria possuem alto custo e podem acarretar outros impactos ambientais (CAI et al., 2020). Tal como, também são utilizados tratamentos microbiológicos, entretanto podem ser influenciados por umidade, biodisponibilidade, temperatura, pH e oxigênio e dificultar o processo de degradação (VIDONISH et al., 2016). Outro método de remediação é a utilização de plantas para remoção de hidrocarbonetos do solo, essa técnica é considerada ecologicamente correta e economicamente viável (KUPPUSAMY et al., 2017).

As plantas possuem papel fundamental para absorção ou estabilidade do contaminante no ambiente e estimulam o crescimento microbiológico (HUANG et al., 1997; PATRA et al., 2020; TÉCHER et al., 2012). Além disso, a rizosfera estimula a microbiota do solo e pode resultar na degradação acelerada dos hidrocarbonetos de petróleo (CZARNY et al., 2019).

Para a redução eficiente dos níveis de contaminação do solo, as plantas devem possuir algumas características essenciais, como a formação de uma grande superfície radicular (De BOER & WAGELMANS, 2016). Além de serem espécies que possuam alta produção de biomassa, resistentes a condições de solo desfavoráveis, com baixa exigência de adubação (REDDY et al., 2020). Outra condição essencial para as plantas é a tolerância aos derivados de petróleo, visto que eles podem afetar negativamente a germinação e desenvolvimento das plantas (TOMAR et al., 2019).

A seleção das espécies vegetais é crucial para o sucesso da recuperação da área degradada. As espécies forrageiras já foram relatadas sobre seu sucesso de potencial e tolerância em solos com hidrocarbonetos (HUSSAIN et al., 2018) e já foram utilizadas para aumentar a biodegradação por serem resistentes a estes compostos (DOMINGUEZ et al., 2019). Elas possuem um rápido crescimento, alta produção de biomassa, adaptabilidade a solos pobres e um bom desenvolvimento do sistema radicular (RABÊLO et al., 2018). Todavia, acredita-se a eficiência das espécies forrageiras para tolerar hidrocarbonetos além de reduzir os seus níveis durante o cultivo.

Assim, o objetivo desse trabalho foi avaliar a tolerância de espécies de forrageiras a hidrocarbonetos derivados do petróleo como forma de selecionar plantas com potencial remediador de áreas contaminadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDULLAH, S.R.S. et al., Plant-assisted remediation of hydrocarbons in water and soil: Application, mechanisms, challenges and opportunities. **Chemosphere**, v. 247, p.1-19, 2020.
- ADAM, G.; DUNCAN, H.J. Effect of diesel fuel on growth of selected plant species. **Environmental Geochemistry and Health**, v.21, p.353-357, 1999.
- BRASIL. Lei nº 6.938 de 31 de agosto de 1981. Dispões sobre a Política Nacional do Meio Ambiente. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 1981.
- CAI, Z. et al. Remediation of soil and groundwater contaminated with organic chemicals using stabilized nanoparticles: Lessons from the past two decades. **Frontiers of Environmental Science & Engineering**, v. 14, n. 5, p. 1-20, 2020.
- CONAMA- Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2000. Resolução nº 420, de 12 de fevereiro de 2004. Acesso em: 02/05/2023.
- COLLINS, C.D. Implementing phytoremediation of petroleum hydrocarbons. **Methods in Biotechnology 23: Phytoremediation**, p.99-108, 2007.
- CZARNY, J. et al., Acinetobacter sp. As the key player in diesel oil degrading Community exposed to PAHs and heavy metals. **Journal of Hazardous Materials**, v.383, p.1-10, 2019.
- DE BOER, J.; WAGELMANS, M. Polycyclic aromatic hydrocarbons in soil- practical options for remediation. **Clean- Soil, Air, Water**, v.44, p.648-653, 2016.
- DENG, Q. et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon exposure, miR-146^a rs2910164 polymorphism, and heart rate variability in coke oven workers. **Environmental Research**, v.148, p.277-84, 2016.
- DOMINGUEZ, J.J.A.; BACOSA, H.P.; CHIEN, M.F.; INOUE, C. Enhanced degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the rhizosphere of sudangrass (*Sorghum drummondii*). **Chemosphere**, v.234, p.789-795, 2019.

IBAMA, Nota Técnica Resíduos sólidos das atividades de exploração e produção de petróleo e gás em bacias sedimentares marítimas do Brasil no ano de 2009, 2011.

HUANG, J.W. et al., Phytoremediation of Lead-Contaminated Soils: Role of Synthetic Chelates in Lead Phytoextraction. **Environmental Science & Technology**, v.31, ed.3, pag. 800-805, 1997.

HUSSAIN, F. et al., Combined application of biochar, compost, and bacterial consortia with Italian ryegrass enhanced phytoremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil. **Environmental and Experimental Botany**, v.153, p.80-88, 2018.

JAGABA, A.H. et al., Circular economy potential and contributions of petroleum industry sludge utilization to environmental sustainability through engineered processes- A review. **Cleaner and Circular Bioeconomy**, v.3, 2022.

KUPPUSAMY, S. et al., Remediation approaches for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) contaminated soils: technological constraints, emerging trends and future directions. **Chemosphere**, v.168, p.944-968, 2017.

LIAO, C. et al., Biosurfactant-enhanced phytoremediation of soils contaminated by crude oil using maize (*Zea mays* L.). **Ecological Engineering**, v.92, p.10-17, 2016.

PATRA, D.K.; PRADHAN, C.; PATRA, H.K. Toxic metal decontamination by phytoremediation approach: Concept, challenges, opportunities and future perspectives. **Environmental Technology & Innovation**, v.18, p.1-6, 2020.

RABÊLO, F.H.; BORGIO, L.; LAVRES, J. The use of forage grasses for the phytoremediation of heavy metals: plant tolerance mechanisms, classifications, and new prospects. **Phytoremediation: Methods, Management and Assessment**, p. 59-103, 2018.

REDDY, K.R.; CHIRAKKARA, R.A.; RIBEIRO, L.F.M. Effects of elevated concentrations of co-existing heavy metals and PAHs in soil on phytoremediation. **Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste**, v.24, 2020.

TÉCHER, D. et al., Assessment of *Miscanthus x giganteus* secondary root metabolites for the biostimulation of PAH-utilizing soil bacteria. **Applied Soil Ecology**, v.62, p.142-146, 2012.

TOMAR, R.S.; SINGH, B.; JAJOO, A. Effects of organic pollutants on photosynthesis. **Photosynthesis, Productivity and Environmental Stress**, p.1-26, 2019.

VIDONISH, J.E. et al., Thermal treatment of hydrocarbon-impacted soils: a review of technology innovation for sustainable remediation. **Engineering**, p.426-437, 2016.

CAPÍTULO 1
IMPACTO DA CONTAMINAÇÃO NO SOLO POR TOLUENO, BENZENO E XILENO
NO CRESCIMENTO DE ESPÉCIES FORRAGEIRAS E NOS INDICADORES
MICROBIOLÓGICOS DO SOLO

RESUMO

A contaminação por hidrocarbonetos de petróleo pode afetar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, comprometendo o crescimento das plantas. Nesta pesquisa buscou-se avaliar os efeitos da presença no solo de três hidrocarbonetos no solo sobre o crescimento e desenvolvimento de espécies forrageiras e nos indicadores microbiológicos do solo. O experimento foi realizado no delineamento experimental de blocos casualizados, com quatro repetições. Os tratamentos foram dispostos em fatorial de 5×4, sendo o primeiro fator constituído pelas espécies avaliadas (*Pennisetum glaucum*, *Zea mays*, *Brachiaria ruziziensis*, *Panicum maximum* e *Sorghum bicolor*). O segundo fator correspondeu a presença dos contaminantes: benzeno, tolueno ou xileno e solo sem contaminante. As espécies foram cultivadas por 42 dias. Os resultados dessa pesquisa evidenciaram que a tolerância das espécies está diretamente ligada ao contaminante presente no solo. A espécie *S. bicolor* foi mais sensível ao tolueno, enquanto o *Z. mays* teve o melhor desempenho. *Z. mays* também foi mais tolerante ao benzeno e as espécies *P. maximum* e *Brachiaria ruziziensis* foram as mais sensíveis. A espécie *P. glaucum* foi menos tolerante ao xileno e *B. ruziziensis* e *P. maximum* tiveram os melhores desempenhos. Assim, as espécies forrageiras apresentaram potencial para uso em programas de remediação, entretanto, a tolerância das espécies depende diretamente do tipo do contaminante.

Palavras-chave: Hidrocarbonetos de Petróleo. Poluição ambiental. Recuperação de áreas.

CHAPTER 1
IMPACT OF TOLUENE, BENZENE AND XYLENE CONTAMINATION IN THE
SOIL ON FORAGGE SPECIES GROWTH AND BIOLOGICAL INDICATORS

ABSTRACT

Contamination by petroleum hydrocarbons can significantly impact the physical, chemical, and biological properties of soil, ultimately compromising plant growth. This study aimed to assess the influence of three specific hydrocarbons in the soil on the growth and development of forage species, along with their impact on soil microbiology. The experiment was conducted using a randomized block design, with four replications. Treatments were organized in a 5×4 factorial design, with the first factor representing the species under evaluation (*Pennisetum glaucum*, *Zea mays*, *Brachiaria ruziziensis*, *Panicum maximum*, and *Sorghum bicolor*). The second factor involved the presence of contaminants: benzene, toluene, xylene, and uncontaminated soil. The species were cultivated for a duration of 42 days. The results demonstrated a direct correlation between the species' tolerance and the specific contaminant present in the soil. Notably, *S. bicolor* proved to be more sensitive to toluene, while *Z. mays* exhibited the most robust performance. *Z. mays* also displayed higher tolerance to benzene, whereas *P. maximum* and *B. ruziziensis* were more susceptible. *P. glaucum* showed lesser tolerance to xylene, while *B. ruziziensis* and *P. maximum* performed exceptionally well. Consequently, forage species exhibit promising potential for use in remediation programs. However, the level of tolerance within each species is contingent on the particular contaminant at play.

Keywords: Petroleum Hydrocarbons, Environmental Pollution, Area Recovery

1. INTRODUÇÃO

Os compostos orgânicos voláteis (COVs) são amplamente utilizados como solventes na indústria e também encontrados em produtos derivados de petróleo (BOONSANER et al., 2011). O benzeno, tolueno e xileno (BTX) são os principais representantes do grupo dos COVs e possuem efeitos cancerígenos e mutagênicos, a longa exposição a estas substâncias acarreta malefícios ao sistema nervoso, coração, rins e um maior risco a desenvolver leucemia não linfocítica (NAING, 2016). Esses componentes estão presentes na água, ar e solo, dessa forma aumenta o risco da exposição humana por ingestão, inalação ou absorção pela pele (YU et al., 2022).

Os níveis de contaminação permitidos no Brasil são regidos pela Resolução CONAMA 420 e estão divididos em contaminação agrícola, residencial e industrial e os valores de investigação, que determinam a concentração de determinada substância no solo na qual existem riscos para o ambiente (BRASIL, 2009). Para o benzeno, o tolueno e o xileno o nível de contaminação máximo permitido no solo é de 0,03; 0,14 e 0,13 em mg kg^{-1} , respectivamente.

Em um estudo realizado no estado do Rio Grande do Norte - Brasil, foram relatados níveis de contaminação em locais próximos a postos de gasolina, com concentrações entre 10,68, e 1368,44 mg kg^{-1} do benzeno, xileno e tolueno (ANJOS, 2012). Em ambientes industriais e de atividades pecuárias, a presença desses compostos no solo também foi encontrada acima dos valores permitidos pela resolução (VARONA-TORRES, 2017; BELLO, 2020). Por outro lado, em solo de uma antiga refinaria, foi encontrado cerca de 1735 mg kg^{-1} de hidrocarbonetos de petróleo (PATOWARY et al., 2023). Estes resultados revelam o potencial contaminador destes derivados do petróleo e a necessidade de tecnologias para reduzir suas concentrações no ambiente.

Para a descontaminação ou redução dessas substâncias no solo tem sido indicado o uso de estratégias diversas, como biorreatores (PRINCIPE et al., 2014), atenuação natural (PAVEL & GAVRILESCU, 2008), extração de vapor do solo e métodos eletrocínéticos (GOMES et al., 2013) e processos químicos e físicos (ACCIOLY et al., 2000). Algumas estratégias, como biorreator e métodos químicos e físicos tem a limitação por serem de alto custo e de difícil implementação (ABDULLAH et al., 2020). Neste caso, uma das alternativas para a recuperação de áreas contaminadas seria o uso de plantas, prática conhecida como fitorremediação. Esta técnica consiste no uso de plantas que podem degradar, acumular ou estimular a degradação pelos microrganismos do solo de contaminantes, com o petróleo e seus derivados (MARQUES et al., 2010; BOONSANER, 2011; SANTOS et al., 2015). Neste último caso, as plantas podem criar condições favoráveis para os microrganismos por meio da

liberação de exsudados, o que estimula a degradação dos contaminantes no solo (KATHI & KHAN, 2011). Algumas famílias de plantas têm se destacado na remediação de petróleo e seus derivados, com destaque para a família das Poaceae (YOUSAF, 2022).

As forrageiras se destacam como plantas de crescimento rápido, alta produção de biomassa, grande capacidade de exploração do solo e de absorver e acumular contaminantes em suas estruturas, contribuindo para a remediação (HUANG, et al., 2004; SIVARAM, et al., 2018). Algumas gramíneas, como o sorgo, o centeio e o trigo já apresentaram potencial para descontaminação de áreas com BTX (SCHNOOR, 1997; SHORES et al., 2018).

O milho, azevém, trigo e sorgo também apresentaram potencial para fitorremediação de derivados de petróleo (SIVARAM, et al., 2018; YOUSAF et al., 2022). A presença de microrganismos no processo de degradação dos contaminantes intensificam a atividade metabólica da biota do solo, a diversidade das comunidades microbiológicas é determinada pela capacidade da planta e do contaminante presente (MUROTOVA, 2012; PHILLIPS et al., 2008).

O desenvolvimento das plantas na remediação dos contaminantes no solo depende, inicialmente, da sensibilidade da espécie aos poluentes. Portanto, este estudo teve como objetivo selecionar e investigar a tolerância de plantas forrageiras ao benzeno, tolueno e xileno, bem como avaliar os efeitos dessas substâncias sobre os indicadores microbiológicos do solo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local do experimento e condições experimentais

O experimento foi realizado em casa de vegetação na Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) localizada na Região Nordeste no município de Mossoró-RN, entre os meses de novembro de 2022 e janeiro de 2023. O clima do local é classificado como semiárido muito quente, BSw^h na classificação de Köppen, durante a execução do experimento a temperatura média da região foi de 28°C (CLIMATE, 2022). A análise do solo utilizado no experimento encontra-se descrita na Tabela 1.

Tabela 1 Análise química e física do solo utilizado no experimento

| Solo | N (g kg ⁻¹) | pH (H ₂ O) | CE (dS m ⁻¹) | M.O. (g kg ⁻¹) | P | K ⁺ (mg dm ³) | Na ⁺ | Ca ⁺² | Mg ⁺² | Al ⁺³ cmol _c .dm ³ | H+Al | SB |
|------|------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--|---|-----------------|------------------|------------------|--|------|------|
| | 0,32 | 7,8 | 0,2 | 2,9 | 7,1 | 76,8 | 12,6 | 3,3 | 0,9 | 0 | 0 | 4,45 |
| A1 | t | CTC | V | M | PST | A. fina | A.grossa | A.total | Silte | Argila | | |
| | cmol _c .dm ³ | | | % | Frações Granulométricas (kg.kg ⁻¹) | | | | | | | |
| | 4,45 | 4,45 | 100 | 0 | 1 | 0,25 | 0,63 | 0,88 | 0,08 | 0,03 | | |

Areia fina: A. fina; Areia grossa: A.grossa; Areia total: A.total; CE: Condutividade elétrica; M.O.: Matéria orgânica; pH: Potencial hidrogeniônico; SB: Soma de bases.

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com quatro repetições. Os tratamentos foram dispostos em fatorial de 5×4 sendo o primeiro fator constituído pelas espécies avaliadas: milheto (*Pennisetum glaucum*), milho (*Zea mays*), capim ruziziensis (*Brachiaria ruziziensis*), capim massai (*Panicum maximum*) e sorgo (*Sorghum bicolor*) cv Ponta Negra. O segundo fator foi relacionado a presença dos contaminantes: benzeno, tolueno ou xileno e sem contaminante.

As unidades experimentais corresponderam a vasos de $1,5 \text{ dm}^3$ preenchidos com solo adicionado de 30% de esterco bovino curtido. Posteriormente, o solo foi adicionado em saco plástico e enriquecido com a solução dos contaminantes de forma individualizada e na concentração de 400 ppm. Os sacos plásticos, contendo o solo e os contaminantes, foram fechados e deixados em repouso por 72 horas visando o equilíbrio entre o contato do solo e do contaminante (GÓMEZ et al, 2014). Os sacos plásticos foram alocados nos vasos na casa de vegetação para o plantio das espécies.

Foram semeadas 8 sementes de cada espécie em cada vaso e, após 5 dias da emergência foi realizado o desbaste, deixando-se 4 plantas por vaso. Os vasos foram irrigados diariamente visando manter a capacidade de campo. Foram realizadas duas adubações com NPK (10 – 50 - 00) e cloreto de potássio durante o período experimental, conforme recomendado para as espécies (EMBRAPA, 2008).

2.2 Crescimento das plantas

O experimento teve duração de 42 dias após a semeadura, o desenvolvimento das plantas pode sofrer alterações devido as ações dos derivados de petróleo. A determinação da área e matéria seca é fundamental para entender como as plantas foram afetadas pela exposição aos contaminantes utilizados. Assim, na ocasião da colheita foi separado a raiz e parte aérea para a determinação da área foliar e radicular, as plantas foram fotografadas em fundo branco e transferidas para o *software* Image J (National Institute of Health, NY, EUA) que determinou as variáveis propostas para análise. Posteriormente, o material vegetal foi lavado em água corrente e acondicionado em estufa de circulação forçada de ar a 70° C até atingir o peso constante para determinação da matéria seca.

2.3 Conteúdo de açúcares, clorofilas e carotenoides

A análise de açúcares solúveis totais foi realizada usando 1 g de material vegetal macerado e misturado em 10 mL de água destilada (DANTAS, 2005). Em seguida, a solução foi filtrada e determinada pelo método da antrona, proposto por Trevelyan & Harrison (1960). Nesse método ocorre a ação hidrolítica e desidratante do ácido sulfúrico concentrado sobre os carboidratos, resultando em um produto final de coloração azul petróleo. A absorbância foi quantificada em espectrofotômetro (modelo UV1601, Visible Spectrophotometer, Shimadzu) a um comprimento de onda de 620 nm, utilizando uma curva padrão de glicose (100 mg mL).

Para a determinação da clorofila a, b e total e carotenoides também foi pesado 1 g do material vegetal, colocado em tubos com acetona a 80% e levados para um ambiente com ausência de luminosidade até descoloração total da planta. Posteriormente, o líquido foi filtrado e uma alíquota de 1 mL coletada para leitura. As mensurações foram realizadas no espectrofotômetro, em comprimento de onda de 645,652 e 663 nm para as clorofilas e 470 nm para os carotenoides (SCOPEL et al., 2011).

Os conteúdos de clorofila a, b e total foram calculados de acordo com Lichtenthaler (1987):

Clorofila a

$$\text{Chl a} = (12,7 \times \text{Abs}_{663}) - (2,69 \times \text{Abs}_{645})$$

Clorofila b

$$\text{Chl b} = (22,9 \times \text{Abs}_{645}) - (4,68 \times \text{Abs}_{663})$$

Clorofila total

$$\text{Tcl} = \text{Chla} + \text{Chlb}$$

A estimativa de carotenoides foi feita utilizando a equação de Lichtenthaler & Wellburn (1983):

Carotenoides

$$\text{Tcar} = (1000 \times \text{Abs}_{470} - 3,27 \times \text{Chla} - 104 \times \text{Chlb}) \div 229$$

2.4 Análises microbiológicas

Ao final do experimento, a microbiota ativa do solo de cada unidade experimental foi avaliada pela técnica de plaqueamento, em triplicata. No qual, 1 g de solo livre raízes e restos vegetais foram adicionados em tubos de ensaio com 9 mL de água destilada e autoclavada. Esta solução foi homogeneizada em um agitador do tipo vortex, em uma diluição em série em: 1:10, 1:100, 1:1000 (NEDER, 1992). Em seguida, 0,1 mL dessa solução foi pipetada em Placas

de Petri contendo meios de cultura para crescimento microbiológico. Os tubos de ensaio depois foram transferidos para banho-maria a 80 °C por 15 minutos e em seguida uma alíquota de 0,1 mL foi colocado em placa de Petri para o crescimento de bactérias esporulantes (DIONÍSIO et al. 2016). Utilizou-se o Potato Dextrose Agar (BDA) para fungos e leveduras e Ágar bacteriológico para crescimento bactérias totais. As placas de Petri foram levadas para uma estufa de crescimento a ± 28 °C. Após 24 horas foram contadas as unidades formadoras de colônia bacteriológica e 96 horas depois a de fungos.

A quantificação foi determinada por unidades formadoras de colônias por grama de solo (UFC g solo^{-1} média das contagens \times diluição selecionada $\times 10$), segundo metodologia de Dionísio et al. (2016).

2.5 Análises Estatísticas

Os dados obtidos nessa pesquisa foram apresentados como média \pm desvio padrão de quatro repetições. As análises estatísticas foram realizadas no *software* RStudio (versão 2023.06.1+524). Os dados foram submetidos a análise de normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk (SHAPIRO & WILK, 1965) e realizado a análise de variância (ANOVA) com teste de comparações múltiplas de Tukey ($p \leq 0,05$). Os gráficos foram feitos com auxílio do *software* SigmaPlot 12.0.

2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análises de crescimento

A área foliar do *P. glaucum* foi reduzida em 35,18% na presença do tolueno no solo (Figura 1A). O *Z. mays*, *S. bicolor* e *B. ruziziensis* não foram afetados pelos contaminantes, enquanto que o *P. maximum* teve a área foliar aumentada no solo com tolueno, benzeno e xileno em 43,34 %, 33,94%, 34,73%, respectivamente, comparados a testemunha

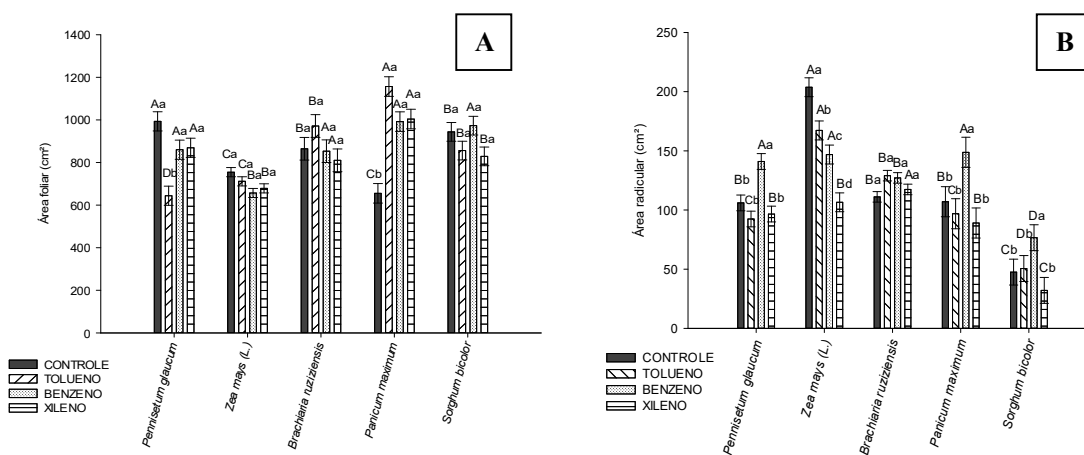


Figura 1 Área foliar (A) e radicular (B) de espécies forrageiras submetidas a contaminação do solo com tolueno, benzeno, xileno. Diferentes letras maiúsculas indicam diferenças significativas entre diferentes espécies, enquanto letras minúsculas indicam diferenças significativas entre a exposição aos contaminantes ($p \leq 0,05$). Todos os dados são apresentados como média \pm desvio padrão ($n=4$).

A área foliar das plantas estudadas não foram tão afetadas pelos COV's, especificamente a espécie *B. ruziziensis* não reduziu área foliar e radicular nos solos com a presença dos contaminantes. Essa característica é considerada essencial para a produção de matéria seca (BURDOVA, 2023). Além de se mostrarem tolerantes ao cultivo em locais contaminados para a não competição com áreas agrícolas comerciais, com a seleção das culturas tolerantes se torna uma estratégia eficaz (PANCALDI & TRINDADE, 2020).

A área radicular de *Z. mays*, *P. maximum* e *S. bicolor* foi reduzida em 17,91%, 9,47% e 6%, respectivamente, na presença do tolueno em relação ao controle (Figura 1B). O benzeno aumentou a área radicular do *P. glaucum*, *P. maximum* e *S. bicolor*, respectivamente, em 24,82%, 28,06% e 37,94%, enquanto reduziu 27,91% do *Z. mays*, comparadas a testemunha. O desenvolvimento pleno do sistema radicular é essencial para ampliar a capacidade de exploração do solo pela planta (KAIMI et al., 2006).

Os resultados sugerem indicativos de tolerância das espécies forrageiras a este tipo de contaminante no solo. Os compostos orgânicos voláteis não foram danosos para forrageiras em pesquisas anteriores, por possuírem características protetoras em suas raízes ou estímulos produzidos pela planta para a aumentar a produção de novas raízes (SHORES et al., 2018).

A espécie *Z. mays* apresentou potencial em outras pesquisas para descontaminação de ambientes com derivados de petróleo (YOUSAF, 2022; LIAO, 2015). A tolerância a estresses é

uma característica dessas espécies e de plantas que possuem via fotossintética C4 (YAMORI et al., 2014; GAWRYLUK, 2022).

A média da matéria seca da parte total (Figura 2) da espécie *P. glaucum* diferenciou da testemunha na presença dos três contaminantes, 26,11%, 10,61% e 32,34% para o tolueno, benzeno e xileno respectivamente. O *Z. mays* teve a matéria seca reduzida em relação ao controle em contato com o tolueno (13,76%) e o benzeno (21,44%). O *S. bicolor* teve sua matéria seca aumentada em 58,05% com o xileno comparada ao controle.

B. ruziziensis e *P. maximum* não diferenciaram na presença para ausência dos contaminantes.

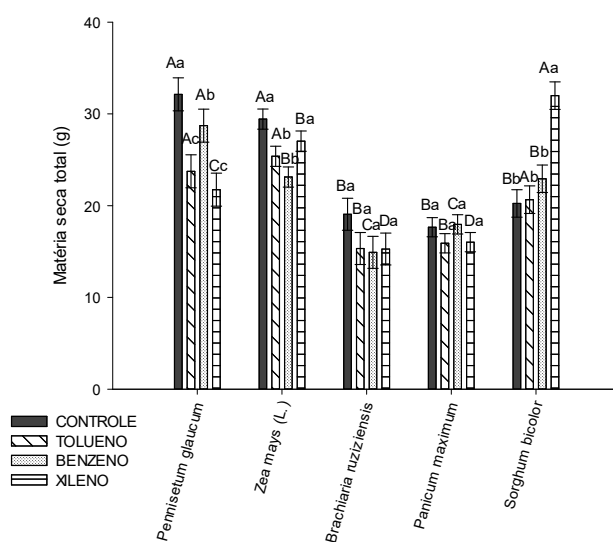


Figura 2 Matéria seca total de espécies forrageiras submetidas a contaminação do solo com tolueno, benzeno, xileno. Diferentes letras maiúsculas indicam diferenças significativas entre diferentes espécies, enquanto letras minúsculas indicam diferenças significativas entre a exposição aos contaminantes ($p \leq 0,05$). Todos os dados são apresentados como média \pm desvio padrão ($n=4$).

As espécies *B. ruziziensis* e *P. maximum* corresponderam a requisitos de alta produção de biomassa na presença dos poluentes, característica desejável para plantas utilizadas em remediação. A produção de matéria seca é um importante parâmetro para avaliar a tolerância e o potencial das espécies para descontaminação de ambientes poluídos por derivados de petróleo (BARROSO et al., 2021).

Liu et al., 2014 afirma que algumas gramíneas possuem sistemas radiculares fibrosos e excessivos tem resistência a poluentes derivados de petróleo, esses são comumente absorvidos

na zona radicular onde podem ser degradados ou volatilizados (LAMEGO & VIDAL, 2007, ABDULLAH, et al., 2020; HUSSAIN et al., 2018).

3.2 Análises de açúcares solúveis totais, clorofilas e carotenoides

O teor de clorofila a da *B. ruziziensis* e *P. maximum* aumentou, respectivamente, em 17,74% e 46,28% em solo com tolueno (Figura 4). O benzeno afetou negativamente o teor de clorofila a nas espécies *B. ruziziensis* (74,14%), *P. maximum* (25,25%) e *S. bicolor* (31,03%). O xileno reduziu em 50% do teor de clorofila a da espécie *P. glaucum*.

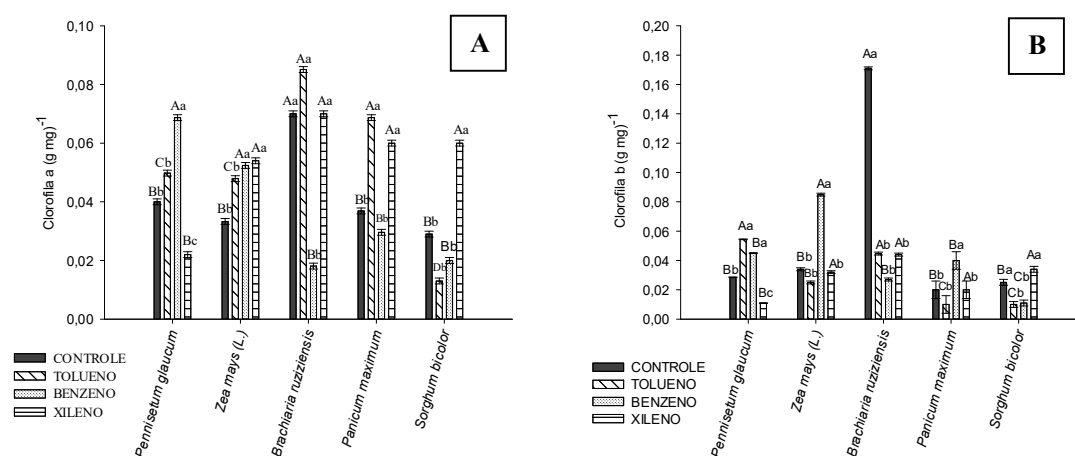


Figura 3 Teor de clorofila a (A) e b (B) de espécies forrageiras submetidas a contaminação do solo com tolueno, benzeno, xileno. Diferentes letras maiúsculas indicam diferenças significativas entre diferentes espécies, enquanto letras minúsculas indicam diferenças significativas entre a exposição aos contaminantes ($p \leq 0,05$). Todos os dados são apresentados como média \pm desvio padrão ($n=4$).

O teor de clorofila b foi menor nas espécies *Z. mays* (26,47%), *P. maximum* (50%) e *Sorghum bicolor* (60,15%) com o tolueno. O benzeno para *Z. mays* e o *P. maximum* aumentou 59,95% e 50% a clorofila b. O xileno afetou a clorofila b do *P. glaucum* (51%) e estimulou a produção no *S. bicolor* (26%), para as demais espécies o poluente não diferenciou.

A influência dos compostos sobre o teor de clorofila a e b dependeu da espécie e do contaminante e cada tipo de planta apresentou um comportamento (KHAN et al., 2019).

O aumento de mais de 50% da clorofila a nas espécies *Z. mays*, *P. glaucum*, *P. maximum* em solo contaminado comparado ao controle, pode ser devido ao estresse químico tóxico, a sensibilidade das plantas à luz pode ser aumentada quando em contato com derivados de petróleo (HUANG et al., 2004). As respostas das espécies apresentam alterações no teor de clorofila na presença dos contaminantes, estas mudanças podem ser benéficas, visto que o transporte dos contaminantes das raízes para a parte aérea pode ser dificultada pela

hidrofobicidade dos compostos assim as partes superiores da planta, onde ocorre a fotossíntese, é protegida da ação dos poluentes (HUANG e tal, 2004).

O conteúdo de clorofila total da espécie *B. ruziziensis* (Figura 4A) em solo com benzeno aumentou 84,09 reduziu 58,18% e 54,7% com tolueno e xileno, respectivamente, em relação ao tratamento controle.

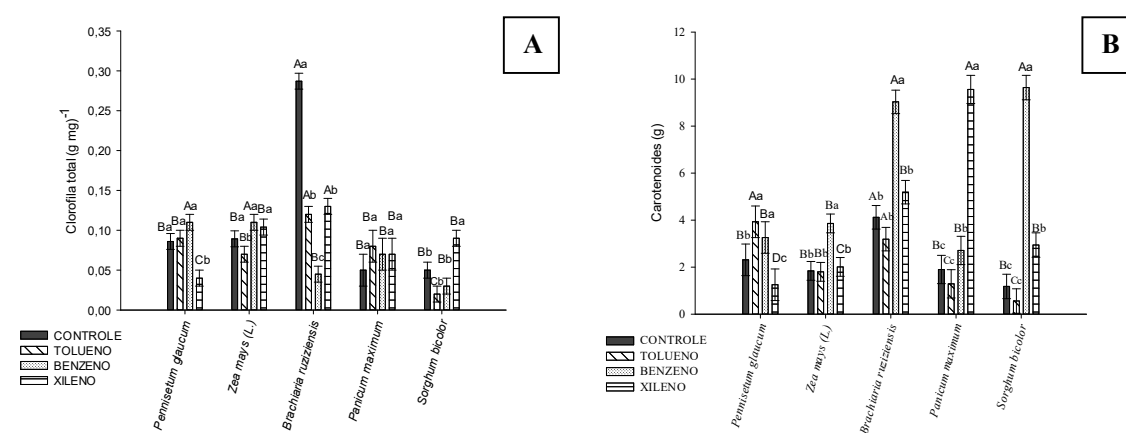


Figura 4 Teor de clorofila total (A) e carotenoides (B) de espécies forrageiras submetidas a contaminação do solo com tolueno, benzeno, xileno. Diferentes letras maiúsculas indicam diferenças significativas entre diferentes espécies, enquanto letras minúsculas indicam diferenças significativas entre a exposição aos contaminantes ($p \leq 0,05$). Todos os dados são apresentados como média \pm desvio padrão ($n=4$).

Os carotenoides (Figura 4B) nas espécies foram reduzidos em 32,10% e 52,54%, respectivamente. Já para a espécie *S. bicolor* aumentou em 87,75% com benzeno no solo e o xileno estimulou o teor de carotenoides da espécie *P. maximum* em 80,12%. Entre as espécies, *P. glaucum* mostrou mais sensibilidade ao xileno e mais tolerante ao tolueno.

As clorofilas são importantes pela responsabilidade de absorver energia luminosa para produzir os fotoassimilados (SHER et al., 2021). Entre as espécies, as que mostraram menor tolerância a um dos poluentes foi *S. bicolor* e *P. maximum* para o tolueno e o *P. glaucum* para o xileno. As demais espécies não apresentaram severas reduções e este pode ser um indicativo de tolerância e sensibilidade das demais espécies a estes compostos orgânicos (BI et al., 2012). A concentração de clorofila é diretamente ligada à eficiência fotossintética das plantas e a sua redução é normalmente identificada em plantas que são cultivadas sob condições de estresse. Esses parâmetros têm sido usados para detectar e avaliar a exposição de plantas a contaminantes ambientais (FAN et al., 2018; ERINLE et al., 2018).

O aumento de mais de 80% dos carotenoides no *S. bicolor* e *B. ruziziensis* na presença do benzeno e o *P. glaucum* com o tolueno pode ser justificada pelo papel de defesa dos

carotenoides, que podem ser aumentados em condições de estresse oxidativo e/ou possa estar associado a eficiência do sistema antioxidante de proteção das plantas (YAN, 2011).

Os carotenoides desempenham o papel não apenas da fotossíntese, mas também na estrutura celular e na defesa antioxidante. A quantidade desse pigmento é uma importante variável bioquímica devido sua importância na vitalidade das plantas e na defesa celular (PILATTI, 2016). As plantas acumulam e sintetizam metabólitos secundários, sob condições de estresse abiótico, como estresse ambiental e nutricional (TRAN et al., 2020) e poluentes orgânicos (WAHMA et al., 2022).

A quantidade de açúcares solúveis totais em *P. glaucum* e *S. bicolor* foi reduzida na presença dos três compostos. A espécie *B. ruziziensis* reduziu na presença do tolueno e benzeno, no entanto na presença do xileno aumentou em 40,72% o teor de açúcares solúveis totais. O *Z. mays* não apresentou diferença estatística e *B. ruziziensis* e *P. maximum* apresentaram maior quantidade de açúcares na presença do xileno, comparado ao controle.

Tabela 2 Quantidade de açúcares solúveis totais (g) em espécies forrageiras cultivadas em solo com tolueno, benzeno e xileno.

| Tratamento | Controle | Tolueno | Benzeno | Xileno |
|-------------------------------|----------|---------|---------|---------|
| <i>Pennisetum glaucum</i> | 7,8Ba | 0,80Ab | 0,72Ab | 0,65Db |
| <i>Zea mays</i> | 0,51Ca | 0,88Aa | 0,57Aa | 1,00Da |
| <i>Brachiaria ruziziensis</i> | 7,48Bb | 1,28Ac | 1,44Ac | 12,62Aa |
| <i>Panicum maximum</i> | 1,01Cb | 0,88Ab | 1,01Ab | 7,14Ca |
| <i>Sorghum bicolor</i> | 12,8Aa | 0,83Ac | 1,38Ac | 9,69Bb |

As letras maiúsculas diferem na coluna e minúsculas na linha, Coeficiente de variação (%): 16,94%.

Os açúcares solúveis totais uma vez absorvido são direcionados para vias energéticas de armazenamento e desintoxicação (PILATTI, 2016). Os conteúdos de açúcares solúveis foram reduzidos nas espécies *P. glaucum* e *S. bicolor* na presença dos três contaminantes, entretanto, aumentou para *B. ruziziensis* e *P. maximum* na presença do xileno, isso sugere que estas espécies podem ter mecanismos que resultam no aumento dos níveis de açúcares em solo contaminado.

Os poluentes orgânicos possuem hidrofobicidade, devido a essa característica, reduzem a capacidade da entrada de água e minerais pelas raízes, podendo aumentar o conteúdo de açúcar solúvel nas folhas das plantas, que é considerado uma resposta da planta pela falta de absorção pelas raízes. Os açúcares também possuem o papel de sinalizador diante a estresses ambientais e na regulação osmótica da planta (HEIDARI, et al, 2018; ROSA et al, 2009).

3.4 Indicadores Microbiológicos

Na quantificação de bactérias totais (Tabela 3), foi avaliado a sensibilidade e tolerância a cada contaminante utilizado na pesquisa. O tolueno estimulou o crescimento de colônias bacteriológicas em *S. bicolor* e *P. glaucum*, comparados ao vaso sem planta. O benzeno afetou significativamente o crescimento das colônias em *P. glaucum*. O xileno aumentou significativamente as colônias em *B. ruzizensis*, para as demais espécies, exceto *Z. mays*, sofreram redução na reprodução das colônias.

Tabela 3 Quantificação de unidades formadoras de colônias (UFC) de bactérias totais ($\times 10^5$ UFCg⁻¹ solo) em solo contaminado por tolueno, benzeno e xileno.

| Tratamento | Controle | Tolueno | Benzeno | Xileno |
|------------------------------|----------|---------|---------|--------|
| Não Plantado | 0,58Bc | 0,72Cc | 5,45Ab | 7,35Ba |
| <i>Pennisetum glaucum</i> | 0,56Bc | 6,73Ba | 0,59Bc | 5,51Cb |
| <i>Zea mays</i> | 3,69Ab | 0,50Cc | 4,71Ab | 7,50Ba |
| <i>Brachiaria ruzizensis</i> | 0,94Bb | 0,45Cb | 0,67Bb | 8,98Aa |
| <i>Panicum maximum</i> | 3,69Ab | 0,66Cc | 4,95Aa | 5,60Ca |
| <i>Sorghum bicolor</i> | 0,72Bd | 10,3Aa | 5,30Ab | 3,95Dc |

As letras maiúsculas diferem na linha enquanto as minúsculas na coluna, Coeficiente de variação (%): 17,09%

O *P. glaucum* e *S. bicolor* tiveram suas populações bacterianas estimuladas com o tolueno.

Quanto ao número de unidades formadoras de colônia das bactérias esporulantes (Tabela 4) entre as espécies apenas *Z. mays* e *P. maximum* reduziram significativamente na presença dos três contaminantes. É possível visualizar o aumento na espécie *P. glaucum* com tolueno. O benzeno reduziu para essa espécie e o xileno não apresentou diferença significativa para o controle. O *S. bicolor* aumentou sua população na presença do benzeno.

Nos vasos não plantados, o benzeno e tolueno tem um aumento significativo na população enquanto o xileno não apresentou diferença estatística para o vaso não plantado. O tolueno apresentou os menores números de bactérias esporulantes quando comparado aos outros poluentes, sendo o *S. bicolor* e o *Z. mays* as espécies mais sensíveis ao tolueno.

Tabela 4 Quantificação de UFC's de bactérias esporulantes ($\times 10^5$, UFCg⁻¹ solo) em solo contaminado por tolueno, benzeno e xileno.

| Tratamento | Controle | Tolueno | Benzeno | Xileno |
|-------------------------------|----------|---------|---------|--------|
| Não Plantado | 0,85Cb | 4,86Ba | 6,36Aa | 0,84Cb |
| <i>Pennisetum glaucum</i> | 3,32Bb | 37,7Aa | 3,65Bc | 6,72Ab |
| <i>Zea mays</i> | 5,44Aa | 0,34Cc | 2,99Bb | 0,63Cc |
| <i>Brachiaria ruziziensis</i> | 5,20Aa | 0,53Cb | 3,42Ba | 3,43Ba |
| <i>Panicum maximum</i> | 6,00Aa | 3,43Bc | 2,98Bc | 5,45Ab |
| <i>Sorghum bicolor</i> | 0,35Cc | 0,52Cc | 6,36Aa | 3,75Bb |

As letras maiúsculas diferem na linha enquanto as minúsculas na coluna, NS: não significativo, Coeficiente de variação (%): 23,51%,

A depender da espécie e do contaminante as bactérias totais foram estimuladas, como para as espécies *P. glaucum* e *S. bicolor*, com tolueno e benzeno, respectivamente, ou seja, relações entre planta e microrganismos podem ter sido fortalecidas para a degradação dos hidrocarbonetos monoaromáticos. Os microrganismos são utilizados para a degradação de compostos derivados de petróleo e possuem habilidades de conversão de substâncias tóxicas para produtos finais que possam ser facilmente assimilados no meio ambiente (ABDULLAH et al., 2020).

As plantas podem ter influência na remediação ambiental, elas estabelecem condições favoráveis para a atividade microbiana do solo na degradação dos poluentes. O crescimento de bactérias com a presença de plantas, indica que a vegetação possa ter favorecido a proliferação, assim sendo o *S. bicolor* e *B. ruziziensis* forrageiras interessantes para o consórcio entre plantas e bactérias (DIAS, 199; CEBRON et al. 2009; ZHANG et al., 2013).

Segundo XU E JOHN (1997) e THACHARODI et al. (2019), quando os hidrocarbonetos de petróleo contaminam o solo, o carbono estimula o crescimento microbiano e causa um desequilíbrio na relação C:N. As bactérias são também vistas como biossensores para detectar o nível de toxicidade no ambiente, pois os autores perceberam um aumento de bactérias quando na ausência das espécies. Esse desenvolvimento microbiano na presença de hidrocarbonetos de petróleo pode estar relacionado à pressão evolutiva seletiva que teria sido exercida pelo meio para os microorganismos criem capacidades metabólicas de sobreviver e crescer em ambientes poluídos (BAOUNE, 2019).

Na tabela 5 é possível observar a quantidade de colônias fúngicas. O *P. glaucum*, *B. ruziziensis* e *S. bicolor* não diferenciaram quanto a atuação dos contaminantes, o *P. maximum* aumentou a população com xileno. O *Z. mays* reduziu os fungos na presença dos três contaminantes. O benzeno e o xileno apresentaram maior número de fungos no vaso sem planta.

Tabela 5 Número de fungos totais ($\times 10^{-3}$, UFC g^{-1} solo) em solo contaminado por tolueno, benzeno e xileno.

| Tratamento | Controle | Tolueno | Benzeno | Xileno |
|-------------------------------|----------|---------|---------|--------|
| Não Plantado | 78,62Aa | 5,0Ac | 80,00Aa | 8,33Ab |
| <i>Pennisetum glaucum</i> | 3,20Ba | 5,40Aa | 2,70Ca | 3,21Ba |
| <i>Zea mays</i> | 5,70Ba | 0,62Cb | 2,92Bb | 0,77Cb |
| <i>Brachiaria ruziziensis</i> | 3,06Ba | 3,05Ba | 2,79Ca | 2,75Ca |
| <i>Panicum maximum</i> | 3,06Bb | 0,38Cb | 3,15Bb | 5,41Ba |
| <i>Sorghum bicolor</i> | 5,96Ba | 3,26Ba | 4,70Ba | 3,82Ba |

As letras maiúsculas diferem nas colunas para as colunas, Coeficiente de variação (%): 17,14%

A remediação de solos contaminados por hidrocarbonetos de petróleo é influenciada pelos microorganismos do solo (GASKIN E BENTHMAN, 2010). As forrageiras são citadas na literatura como promissoras para remediação por hidrocarbonetos junto ao estímulo de microorganismos que são capazes de degradar estes compostos utilizando-os como fonte de energia (ROSATO, 1997; OUDOT, 1998; MURATOVA, 2012).

A degradação dos COV's em solo, é pouco conhecida e avaliar a dinâmica dos microorganismos presentes é fundamental para entender e otimizar a remediação dos solos contaminados. Entender sobre a estrutura da comunidade microbiana, é necessário para maiores avanços (LIAO, 2016, MATHURASA, et al., 2012).

Guimarães et al. (2010), afirmaram a tendência do aumento de microorganismos em poços com alta concentração de BTEX, e quanto maior a concentração maior é o número desses indivíduos. Nos resultados acima (Tabela 5), é possível visualizar o aumento de colônias em vasos que estavam sem plantas e com o contaminante, que podem ser tolerantes e degradadoras, dessa forma, a investigação e identificação dessas células, principalmente para consórcios entre planta e microorganismos (CAMPESTRINI & INZUNZA, 2005).

Os resultados reforçam a hipótese que não há apenas um tipo de interação poluente-planta-solo. Mesmo as plantas em condições iguais de desenvolvimento, é preciso avaliar o tamanho da área de contaminação, a capacidade de retenção do solo e o tipo do poluente a ser analisado. As espécies forrageiras desse estudo mostraram tolerância a poluentes derivados de petróleo e são aptas para serem implementadas em programas de fitorremediação de áreas degradadas.

A continuidade da pesquisa é essencial para a descoberta das espécies de microorganismos que venham a facilitar o processo de recuperação de área degradada por compostos orgânicos voláteis.

4. CONCLUSÕES

Diferentes espécies forrageiras têm respostas distintas sob o impacto causado por um contaminante específico. O *S. bicolor* sofreu mais aos impactos do tolueno, o *P. maximum* e a *B. ruzizensis* ao benzeno e o *P.glaucum* ao xileno. A espécie mais tolerante ao tolueno e benzeno é *Z. mays*, e a *B. ruzizensis* e o *P. maximum* ao xileno essas espécies são aptas a serem utilizadas para o manejo em áreas contaminadas visando à recuperação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACCIOLY, A.M.A et al. Contaminação química e biorremediação dos solos: Tópicos em Ciência do Solo. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v.1, p.299-352, 2000.
- AFEGBUA, S. L.; BATTY, L.C. Effect of single and mixed polycyclic aromatic hydrocarbon contamination on plant biomass yield and PAH dissipation during phytoremediation. **Environ. Sci. Pollut. Res.**, v.25, p.18596-18603, 2018.
- ANJOS, R.B. Avaliação de HPA e BTEX no solo e água subterrânea, em postos de revenda de combustíveis: Estudo de caso na cidade de Natal-RN. **Dissertação de Mestrado**, 2012.
- BARROSO, G.M. et al. *Mabea fistulifera* and *Zeyheria tuberculosa* can be indicated for phytoremediation programs of soils contaminated with hormonal herbicides. **International Journal of Phytoremediation**, p. 1-8, 2021.
- BELLO, P.P.G. Environmental Investigation of the old Chemical Industry. **Holos environment**, v. 20, p. 559-583, 2020.
- BI, Y.G. et al., Phytotoxicity, bioaccumulation and degradation of isoproturon in green algae. **Journal of hazardous materials**, v. 243, p. 242-249, 2012.
- BOONSANER, M.; BORRIRUKWISITKAK, S.; BOONSANER, A. Phytoremediation of BTEX contaminated soil by *Canna x generalis*. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 74, p. 1700-1707, 2011.
- BUDOVÁ, H. et al., The influence of diesel contaminated soil on *Miscanthus x giganteus* biomass thermal utilization and pyrolysis products composition. **Journal of Cleaner Production**, v. 406, p. 1-13, 2023.
- CEBRON, A. et al., Influence of vegetation on the in situ bacterial Community and polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) degraders in aged PAH-Contaminated or thermal desorption-treated soil. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 75, p. 6322-6330, 2009.
- CHARY, N.S.; FERNANDEZ-ALBA, A.R. Determination of volatile organic compounds in drinking and environmental waters. **Trends in Analytical Chemistry**, v. 32, p.60-75, 2012.
- CLIMATEMPO, Climatologia Mossoró, 2022. Acesso em: 01/05/2023. Disponível em: <<https://www.climatepo.com.br/previsao-do-tempo>>.
- NAING, N.N.; LI, S.F.; LEE, H.K. Application of porous membrane-protected chitosan microspheres to determine benzene, toluene, ethylbenzene, xylenes and styrene in water. **Journal of Chromatography A**, v. 1448, p. 42-48, 2016.

CONAMA- Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2000. Resolução nº 420, de 12 de fevereiro de 2004. Acesso em: 02/05/2023.

DANTAS, B.F.; RIBEIRO, L.S.; SILVA, A.P.; LUZ, S.R. Foliar Carbohydrates Content and invertase Activity in Vines at São Francisco River Valley- Brazil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 27, p. 198-202, 2005.

DUDAI, N. et al., Agronomic and economic evaluation of Vetiver grass (*Vetiveria zizanioides* L.) as means for phytoremediation of diesel polluted soils in Israel. **Journal of Environmental Management**, v. 211, p. 247-255, 2018.

EMBRAPA, Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco, ed.2, p.212, 2008.

ENRINLE, K.O. et al. Physiological and molecular responses of pearl millet seedling to atrazine stress. **International Journal of phytoremediation**, v. 20, n. 4, p. 343-351, 2018.

FAN, X. et al. Responses of photosynthesis-related parameters and chloroplast ultrastructure to atrazine in alfalfa (*Medicago sativa* L.) inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 166, p. 102-108, 2018.

GAWRYLUK, A.; STEPNIOWSKA, A.; LIPINSKA, H. Effect of soil contamination with polycyclic aromatic hydrocarbons from drilling waste on germination and growth of lawn grasses. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 236, 2022.

GOMES, H.I.; DIAS-FERREIRA, C.; RIBEIRO, A.B. Overview of in situ and ex situ remediation Technologies for PCB- contaminated soils and sediments and obstacles for full-scale application, v.445, p. 237-260, 2013.

GUIMARÃES, L.B. et al. Uso de ferramenta de biologia molecular na investigação de áreas impactadas por derivados de petróleo. **Águas Subterrâneas**, 2010.

HEIDARI, S.; GHAZVINI, R.F.; ZAVAREH, M.; KAFI, M. Physiological responses and phytoremediation ability of Eastern Coneflower (*Echinacea purpurea*) for crude oil contaminated soil, **Caspian Journal of Environmental Sciences**, v. 16, p. 149-164, 2018.

HUANG, X.D. et al., Responses of three grass species to creosote during phytoremediation. **Environmental Pollution**, v. 130, p. 453-463, 2004.

KAIMI, E. et al. Ryegrass enhancement of biodegradation in diesel-contaminated soil. **Environmental and Experimental Botany**, v.55, n. 1, p. 110-119, 2006.

KHAN, A.D. et al. Soil amendments enhanced the growth of *Nicotiana glauca* L. and *Petunia hybrida* L. by stabilizing heavy metals from wastewater. **Journal of Environmental Management**, v. 242, p. 46-55, 2019.

- LAMEGO, F.P.; VIDAL, R.A. Fitorremediação: Plantas como agentes de despoluição? **Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, v. 17, p. 9-18, 2007.
- LEE, S.H; LEE, W.S.; LEE, C.H.; KIM, J.G. Degradation of phenanthrene and pyrene in rhizosphere of grasses and legumes. **Journal Hazard. Mater.**, v. 153, p. 892-898, 2008.
- LIAO, C et al., Accumulation of hydrocarbons by maize (*Zea mays* L.) in remediation of soils contaminated with crude oil. **International Journal of Phytoremediation**, v. 17, p. 693-700, 2015.
- LIAO, C. et al., Biosurfactant-enhanced phytoremediation of soils contaminated by crude oil using maize (*Zea mays* L.), **Ecological Engineering**, v. 92, p. 10-17, 2016.
- LICHTENTHALER, H.K. Chlorophyll and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods in Enzymology** ed. 148, p.331-382, 1987.
- LICHTENTHALER, H.K.; WELLBURN, A. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. **Biochemical Society Transactions** v. 603, p.591-592, 1983.
- LIU, R. et al., Responses to phytoremediation of PAH-Contaminated soil using *Echinacea purpurea* (L.) **Water Air Soil Pollut**, v.12, p. 225-233, 2014.
- MARQUES, M. et al. Seedling emergence and biomass growth of oleaginous and other tropical in oil contaminated soil. **Open Waste Management Journal**, v.3, p.26-32, 2010.
- MATHURASA, L.; TONGCUMPOU, C.; SABATINI, D.A.; LUEPROMCHAI, E. Anionic surfactante enhanced bacterial degradation of tributyltin in soil, **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 75, p. 7-14, 2012.
- MURATOVA, A.Y. et al., Remediating abilities of diferente plant species grown in diesel-fuel-contaminated leached chernozem. **Applied Soil Ecology**, v.56, p.51-57, 2012.
- OUDOT, J.; MERLIN, F.X.; PINVIDIC, P. Weathering rates of oil components in a bioremediation experiment in estuarine sediments. **Marine Environ. Res.**, v. 45, n. 2, p. 113-125, 1998.
- OWABOR, C.N et al. Comparative Study of the Adsorption and Desorption Behavior of Single and Multi Ring Aromatics in Sediment Fractions. **Advances in Chemical Engineering and Science**, v.3, p. 1-7, 2013.
- PANCALDI, F.; TRINDADE, L.M. Marginal lands to grow novel bio-based crops: a plant breeding perspective. **Front. Plant Science**, v. 11, 2020.

PATOWARY, K. et al. Soil treatment using a biosurfactant producing bacterial consortium in rice fields contaminated with oily sludge- a sustainable approach, **Environmental Research**, v.220, 2023.

PAVEL, L.V.; GAVRILESCU, M Overview of ex situ descontamination techniques for soil cleanup, **Environmental Engineering and Management Journal**, v.7, p.815-834,2008.

PILATTI, F.K. et al., *In vitro* exposure of *Ulva lactuca* Linnaeus (Chlorophyta) to gasoline- Biochemical and morphological alterations, **Chemosphere**, v. 156, p. 428-437, 2016.

PRINCE, R.C. Crude oil releases to the environment: Natural fate and remediation options. **Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences**, 2014.

ROSA, M. et al. Soluble sugars- metabolismo sensing and abiotic stress. **Plant Signaling & Behavior**, ed.4, p. 388-393, 2009.

ROSATO, Y.B. Biodegradação do petróleo. In: MELO, I.S.; AZEVEDO, J.L. Microbiologia ambiental. Jaguariúna: EMBRAPA, p.308-334, 1997.

SANTOS, N.M. et al. Biodisponibilidade de chumbo por extratores químicos em solo tratado com ácidos húmicos e carvão ativado. **Revista Ciência Agronômica**, v.46, p.663-668, 2015.

SCHNOOR, J.D. Phytoremediation, Technology Evaluation Report. **Ground- Water Remediation Technologies**, 1997.

SCOPEL, W.; BARBOSA, J.Z.; VIEIRA, M.L. Extração de pigmentos foliares em plantas de canola. **Unoesc & Ciência**, v. 2, p. 87-94, 2011.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 52, n. 3/4, p. 591-611, 1965.

SHER, A. et al. The Growth, physiological and biochemical response of foxtail millet to atrazine herbicide. **Saudi Journal of biological sciences**, v. 28, p. 6471-6479, 2021.

SHORES, A.R. Phytoremediation of BTEX and Naphtalene from produced-water spill sites using *Poaceae*. **International Journal of Phytoremediation**, v. 20, p. 823-830, 2018.

SILVA, M.S. et al. Desafios e Estratégias da Fitorremediação no Meio Ambiente. **Pesquisas Agrárias e Ambientais**, v.3, p. 6-17, 2020.

SIVARAM, A.K. et al., Impact of plant photosystems in the remediation of benzo[a]pyrene and pyrene spiked soils, **Chemosphere**, v.193, p.625-634, 2018.

THACHARODI, A.; JEGANATHAN, C.; THACHARODI, D. Biomonitoring of Heavy Metal Pollution by Bioluminescent Bacterial Biosensors, **Indian Journal of Science and Technology**, v. 12, p. 1-9, 2019.

TOMAR, R.S.; SINGH, B., JAJOO, A. Effects of Organic Pollutants on photosynthesis, **Photosynthesis, Productivity and Environmental Stress**, cap. 1, 2019.

TRAN, T.L.N.; MIRANDA, A.F.; ABEYNAYAKE, S.W.; MOURADOV, A. Differential production of phenolics, lipids, carbohydrates and pro-teins in stressed and unstressed aquatic plants, *Azolla filiculoides* and *Azolla pinnata*. **Biology**, ed.9, p. 342, 2020.

TREVELYAN, W.E.; HARRISON, T.S. Dosagem de glicídeos totais pelo método de antrona. **J.Biochem.**, v. 50, p. 292, 1952.

U.S. Department of Agriculture. Relative salt tolerance of herbaceous Crops, 1999. Disponível em: <http://www.usssl.ars.usda.gov/pls/caliche/SALTT42B>. Acesso em: 04/05/23.

VILLELA, G.G., BACILA, M.; TASTALDI, H. **Técnicas e Experimentos de Bioquímica**, ed. Guanabara, p. 552. São Paulo, SP, 1973.

VARONA-TORRES et al., The Characterization of BTEX in variable soil composition near unconventional oil and gas development. **Advances in Chemical Pollution, Environmental Management and Protection**, v.1, p. 321-351, 2017.

WAHMAN, R. et al., The changes in *Lemna minor* metabolomic profile: A response to diclofenac incubation, **Chemosphere**, v. 287, 2022.

WEELINK, S.A.B.; EEKERT, M.H.A.; STAMS, A.J.M. Degradation of Btex by anaerobic bacteria: physiology and application, **Environmental Science and Bio/Technology**, v. 9, p. 359-385, 2010.

YAN, et al. Ultrasonic-assisted extraction optimized by response surface methodology, chemical composition and antioxidant activity of polysaccharides from *Tremella mesenterica*, **Carbohydrate Polymers**, v. 83, p. 217-224, 2011.

YOUSAF, U. et al. Interactive effect of biochar and compost with Poaceae and Fabaceae plants on remediation of total petroleum hydrocarbons in crude oil contaminated soil. **Chemosphere**, v. 286, 2022.

YU, B.; YUAN, Z.; YU, Z.; XUE-SONG, F. BTEX in the environment: Na update on sources, fate, distribution, pretreatment, analysis, and removal techniques. **Chemical Engineering Journal**, v. 435, 2022.

ZHANG, X. et al. Degradation of diesel pollutants in Huangpu-Yangtze River estuary wetland using plant-microbe systems, **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 76, p. 71-75, 2013.

CÁPITULO 2

POTENCIAL DE ESPÉCIES FORRAGEIRAS PARA REMEDIAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS COM ÓLEO DIESEL

RESUMO

A contaminação de solos decorrente do transporte, refino e vazamentos de óleo diesel reduz a qualidade e saúde dos ecossistemas. Técnicas de recuperação são aplicadas nesses ambientes como a utilização de espécies vegetais com potencial remediador que auxiliam na degradação, transformação ou estabilização dos poluentes. Dessa forma, este trabalho objetivou avaliar o potencial de espécies forrageiras para a recuperação de um solo contaminado por óleo diesel comercial. O experimento foi realizado no delineamento experimental de blocos casualizados, com quatro repetições. Os tratamentos foram dispostos em fatorial de 5 x 3, sendo o primeiro fator composto pelas espécies (*Pennisetum glaucum*, *Zea mays*, *Brachiaria ruziziensis*, *Panicum maximum* e *Sorghum bicolor*). O segundo fator formado pelas concentrações do óleo diesel: 100 mg kg⁻¹ ou 500 mg kg⁻¹ e solo sem contaminante. As espécies foram cultivadas por 42 dias. Este estudo demonstrou que as espécies forrageiras têm potencial para serem usadas em programas de fitorremediação. As espécies mais tolerantes a concentração de 100 mg kg⁻¹ do óleo diesel foram *P. glaucum* e *P. maximum*. Na maior concentração, as espécies mais tolerantes foram *P. maximum* e *S. bicolor*. *Z. mays* foi a espécie mais sensível, não sendo a melhor opção para a remediação desse tipo de contaminante. As espécies forrageiras mostraram potencial para remediação de áreas degradadas por óleo diesel.

Palavras- Chave: Descontaminação. Hidrocarbonetos de petróleo. Sensibilidade.

CHAPTER 2

POTENTIAL OF FORAGE SPECIES FOR REMEDIATION OF SOILS CONTAMINATED WITH DIESEL OIL

ABSTRACT

Soil contamination resulting from diesel oil transportation, refining, and spills has adverse effects on ecosystem quality and health. Remediation techniques are employed in these environments, often involving the use of plant species with the potential to assist in the degradation, transformation, or stabilization of pollutants. Therefore, this study aimed to assess the suitability of certain forage species for the recovery of soil contaminated with commercial diesel oil. The experiment was conducted following a randomized block design, with four replications. The treatments were organized in a 5 x 3 factorial design, with the first factor consisting of the plant species under consideration (*Pennisetum glaucum*, *Zea mays*, *Brachiaria ruziziensis*, *Panicum maximum*, and *Sorghum bicolor*). The second factor was determined by the concentrations of diesel oil: 100 mg kg⁻¹, 500 mg kg⁻¹, and uncontaminated soil. The selected species were cultivated for a duration of 42 days. This investigation revealed the potential of forage species for use in phytoremediation programs. Among the species, *Pennisetum glaucum* and *Panicum maximum* exhibited the highest tolerance to a concentration of 100 mg kg⁻¹ of diesel oil. At the higher concentration of 500 mg kg⁻¹, *Panicum maximum* and *Sorghum bicolor* proved to be the most resilient species. Conversely, *Zea mays* was the most sensitive species and may not be the most suitable choice for remediating this type of contaminant. These findings highlight the promise of forage species for the restoration of areas impacted by diesel oil contamination.

Keywords: Decontamination, Petroleum Hydrocarbons, Sensitivity

1. INTRODUÇÃO

As atividades industriais realizadas de forma inadequada contribuem para a contaminação do solo, de cursos de água e do lençol freático e geram grande preocupação pela poluição ambiental (ESTRELA, 2018). O transporte de combustíveis tem gerado riscos ambientais, como derramamentos, vazamentos e descargas, principalmente nas áreas industriais e agrícolas (KHAN et al., 2013).

O óleo diesel, utilizado em veículos e máquinas de atividades agrícolas, se destaca pelo seu conteúdo complexo de hidrocarbonetos derivados de petróleo (Wang et al., 1990). Desde a extração até a armazenagem do óleo é crescente a preocupação com vazamento, principalmente na má armazenagem e em vazamentos nos tanques subterrâneos (BRITO et al., 2010). Atualmente, na indústria, é permitido o descarte de água com um teor de óleos e graxas de até 20 mg L⁻¹, conforme estabelecido pela Resolução CONAMA 357 de 2005. Entretanto, pesquisas recentes já identificaram resíduos na faixa de 100-150 mg L⁻¹ (SILVA et al., 2020).

A contaminação do solo por óleo diesel é comum e tem impactos ecológicos negativos (HAIDER et al., 2021). Nesse contexto, a fitorremediação emerge como uma solução ecológica que utiliza plantas apropriadas, mostrando-se promissora inclusive em experimentos em casa de vegetação (VOCCIANTE et al., 2019). Portanto, é preferível escolher as plantas de acordo com sua biomassa e tolerância (BARRUTIA et al., 2011).

A utilização de gramíneas forrageiras para descontaminação de ambientes é viável devido a sua alta produção de biomassa, rápido crescimento e facilidade de rebrota. A gramínea vetiver (*Vetiveria zizanioides* L.), por exemplo, apresentou um bom potencial agrônômico e econômico para descontaminação de solo poluído com óleo diesel (DUDAI et al., 2018). Também é visto na literatura a tolerância de gramíneas forrageiras ao óleo, com eficiência de remoção estatisticamente significativa (CAI et al., 2016). A *Pennisetum glaucum* (L.) R.Br., *Brachiaria ramosa* e *Sorgo sudanense*, em estudo em casa de vegetação apresentou sucesso na remoção de hidrocarbonetos de petróleo e apresentaram bom crescimento (THOMAS et al., 2002).

A contaminação do solo e das águas subterrâneas por óleo diesel pode persistir por anos, causando impactos ambientais de longo prazo. Portanto, a necessidade de desenvolver e aprimorar técnicas de remediação para lidar eficazmente com a contaminação por óleo diesel é crítica. Neste estudo, buscou-se selecionar espécies tolerantes ao óleo diesel com potencial no uso em programas de remediação visando contribuir para a preservação ambiental, a segurança pública e o desenvolvimento sustentável.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local do experimento e condições experimentais

O experimento foi realizado em casa de vegetação na Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) localizada na Região Nordeste no município de Mossoró-RN, entre os meses de novembro de 2022 e janeiro de 2023. O clima do local é classificado como semiárido muito quente, BSw_h' na classificação de Köppen, durante a execução do experimento a temperatura média da região foi de 28°C (CLIMATE, 2022). A análise do solo utilizado no experimento encontra-se descrita na Tabela 1.

Tabela 1 Análise química e física do solo utilizado no experimento.

| Solo | N (g kg ⁻¹) | pH (H ₂ O) | CE (dS m ⁻¹) | M.O. (g kg ⁻¹) | P | K ⁺ (mg dm ³) | Na ⁺ | Ca ⁺² | Mg ⁺² | Al ⁺³ cmol _c dm ³ | H+Al | SB |
|------|----------------------------|--------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----|---|-----------------|------------------|------------------|---|------|------|
| | 0,32 | 7,8 | 0,2 | 2,9 | 7,1 | 76,8 | 12,6 | 3,3 | 0,9 | 0 | 0 | 4,45 |
| A1 | t | CTC | V | M | PST | A. fina | A.grossa | A.total | Silte | Argila | | |
| | 4,45 | 4,45 | 100 | 0 | 1 | 0,25 | 0,63 | 0,88 | 0,08 | 0,03 | | |

Areia fina: A. fina; Areia grossa: A.grossa; Areia total: A.total; CE: Condutividade elétrica; M.O.: Matéria orgânica; pH: Potencial hidrogeniônico; SB: Soma de bases.

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com quatro repetições. Os tratamentos foram dispostos em fatorial de 5 x 3, sendo o primeiro fator constituído pelas espécies avaliadas: milheto (*Pennisetum glaucum*), milho (*Zea mays*), capim ruziziensis (*Brachiaria ruziziensis*), capim massai (*Panicum maximum* L.) e sorgo (*Sorghum bicolor*) cv Ponta Negra. O segundo fator correspondeu a concentração do óleo diesel: 100 ou 500 mg kg⁻¹ e sem o poluente.

O solo foi adicionado em saco plástico e enriquecido com a solução dos contaminantes de forma individualizada e na concentração de 100 e 500ppm mg kg⁻¹. Os sacos plásticos, contendo o solo e os contaminantes, foram fechados e deixados em repouso por 72 horas visando o equilíbrio entre o contato do solo e do contaminante (GÓMEZ et al, 2014). Os sacos plásticos foram alocados nos vasos na casa de vegetação para o plantio das espécies.

Foram semeadas 8 sementes de cada espécie em cada vaso e, após 5 dias da emergência foi realizado o desbaste, deixando-se 4 plantas por vaso. Os vasos foram irrigados diariamente visando manter a capacidade de campo. Foram realizadas duas adubações com NPK (10 – 50 – 00) e cloreto de potássio durante o período experimental, conforme recomendado para as espécies (EMBRAPA, 2008).

2.2 Crescimento das plantas

O experimento teve duração de 42 dias após a semeadura, o desenvolvimento das plantas pode sofrer alterações devido as ações dos derivados de petróleo. A determinação da área e matéria seca é fundamental para entender como as plantas foram afetadas pela exposição aos contaminantes utilizados. Assim, na ocasião da colheita foi separado a raiz e parte aérea para a determinação da área foliar e radicular, as plantas foram fotografadas em fundo branco e transferidas para o *software* Image J (National Institute of Health, NY, EUA) que determinou as variáveis propostas para análise. Posteriormente, o material vegetal foi lavado em água corrente e acondicionado em estufa de circulação forçada de ar a 70° C até atingir o peso constante para determinação da matéria seca.

2.3 Conteúdo de açúcares, clorofilas e carotenoides

A análise de açúcares solúveis totais foi realizada usando 1 g de material vegetal macerado e misturado em 10 mL de água destilada (DANTAS, 2005). Em seguida, a solução foi filtrada e determinada pelo método da antrona, proposto por Trevelyan & Harrison (1960). Nesse método ocorre a ação hidrolítica e desidratante do ácido sulfúrico concentrado sobre os carboidratos, resultando em um produto final de coloração azul petróleo. A absorbância foi quantificada em espectrofotômetro (modelo UV1601, Visible Spectrophotometer, Shimadzu) a um comprimento de onda de 620 nm, utilizando uma curva padrão de glicose (100 mg mL).

Para a determinação da clorofila a, b e total e carotenoides também foi pesado 1 g do material vegetal, colocado em tubos com acetona a 80% e levados para um ambiente com ausência de luminosidade até descoloração total da planta. Posteriormente, o líquido foi filtrado e uma alíquota de 1 mL coletada para leitura. As mensurações foram realizadas no espectrofotômetro, em comprimento de onda de 645,652 e 663 nm para as clorofilas e 470 nm para os carotenoides (SCOPEL et al., 2011).

Os conteúdos de clorofila a, b e total foram calculados de acordo com Lichthenthaler (1987):

Clorofila a

$$\text{Chl a} = (12,7 \times \text{Abs}_{663}) - (2,69 \times \text{Abs}_{645})$$

Clorofila b

$$\text{Chl b} = (22,9 \times \text{Abs}_{645}) - (4,68 \times \text{Abs}_{663})$$

Clorofila total

$$\text{Tcl} = \text{Chla} + \text{Chlb}$$

A estimativa de carotenoides foi feita utilizando a equação de Lichtenthaler & Wellburn (1983):

Carotenoides

$$T_{car} = (1000 \times Abs_{470} - 3,27 \times Chla - 104 \times Chlb) \div 229$$

2.4 Análises Estatísticas

Os dados obtidos nessa pesquisa foram apresentados como média \pm desvio padrão de quatro repetições. As análises estatísticas foram realizadas no *software* RStudio (versão 2023.06.1+524). Os dados foram submetidos a análise de normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk (SHAPIRO & WILK, 1965) e realizado a análise de variância (ANOVA) com teste de comparações múltiplas de Tukey ($p \leq 0,05$). Os gráficos foram feitos com auxílio do *software* SigmaPlot 12.0.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análises de crescimento

O óleo diesel reduziu a área foliar do *Z. mays* em 19,68% e 24,60% nas concentrações de 500 e 1000 ppm, respectivamente (Figura 1A). A espécie *B. ruziziensis* aumentou 29% e 17,41% na área foliar quando expostas à concentração de 500 ppm de óleo diesel. A área foliar do *Z. mays* foi reduzida no solo com óleo diesel em ambas concentrações. As demais espécies não mostraram diferenças nas duas concentrações.

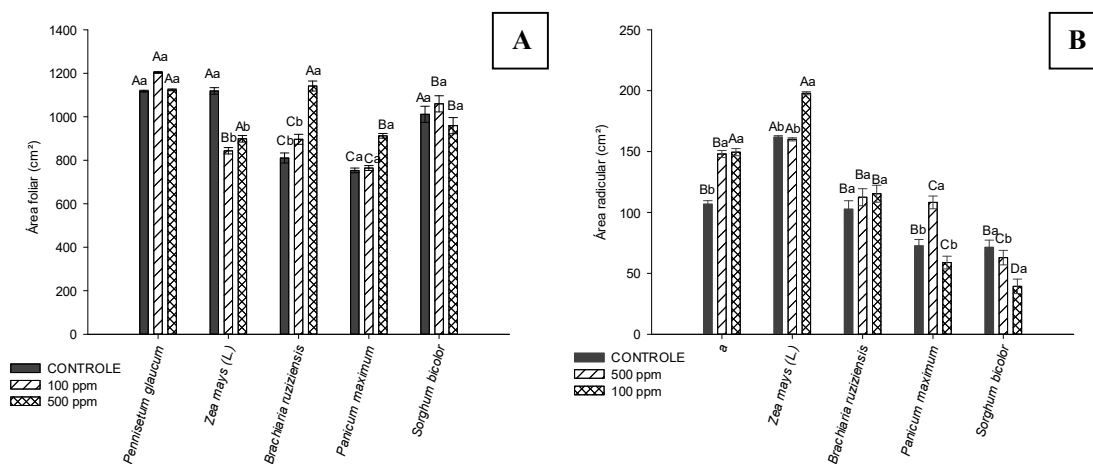


Figura 1 Área foliar (A) e radicular (B) das espécies forrageiras submetidas a contaminação por óleo diesel. Diferentes letras maiúsculas indicam diferenças significativas entre espécies e letras minúsculas indicam diferenças significativas entre a exposição a concentração do óleo diesel ($p \leq 0,05$). Todos os dados são apresentados como média \pm desvio padrão ($n=4$).

Estes resultados indicam que o óleo diesel teve um efeito positivo na área foliar da *B. ruziziensis* em comparação com o grupo de controle. Essa resposta pode ser atribuída tanto ao estresse induzido pelo contaminante quanto à capacidade das espécies de aproveitar os compostos orgânicos presentes no óleo diesel (TONEL, 2014). É possível que esses compostos tenham sido direcionados para o desenvolvimento das plantas, sem causar impactos significativos ao longo do período de avaliação.

Ao analisar a área radicular das plantas (Figura 1B) o *P. glaucum* aumentou 28% nas duas concentrações de óleo diesel testadas. Por outro lado, a espécie *Z. mays* demonstrou um aumento de 18,22% na área radicular na concentração mais alta. A mesma tendência observou-se no *P. maximum* na concentração de 100 ppm (32,95%). O *S.bicolor* foi a espécie mais sensível aos efeitos do óleo diesel.

Estudos anteriores indicaram que o milho pode ser uma opção viável para a fitorremediação de derivados de petróleo quando combinado com estimulantes como lodo de esgoto, biocarvão ou biossurfactante (ASADOLLAHI, 2016; LIAO, 2016; YOUSAF, 2022). No entanto, nesta pesquisa, observou-se que o milho teve uma redução na área foliar e um aumento na área radicular na presença de óleo diesel. O potencial de remediação do milho pode ser aprimorado quando consorciado com microrganismos ou compostos, favorecendo a degradação dos hidrocarbonetos (SHAHZAD et al., 2016; KHAN et al., 2019).

Na figura 2, é possível ver que a matéria seca da parte aérea foi aumentada em todas as espécies na presença do óleo diesel quando comparadas a planta testemunha.

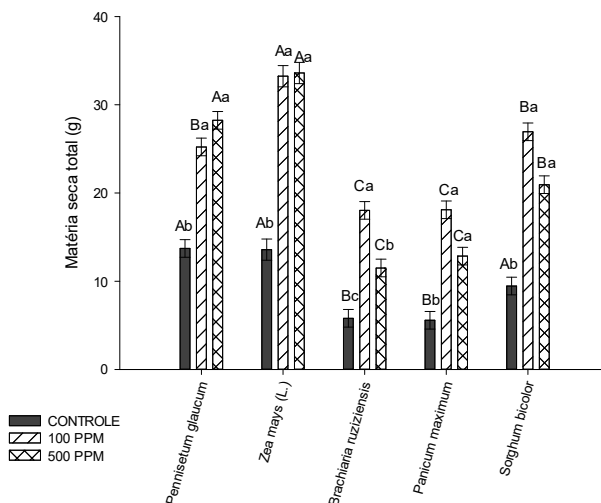


Figura 2 Matéria seca total de espécies forrageiras submetidas a solos contaminados por óleo diesel. Diferentes letras maiúsculas indicam diferenças significativas entre espécies e letras minúsculas indicam diferenças significativas entre a concentração do óleo diesel ($p \leq 0,05$). Todos os dados são apresentados como média \pm desvio padrão ($n=4$).

O aumento da matéria seca das espécies na presença do óleo diesel, responde a um dos requisitos de espécies como potenciais fitorremediadoras, além da possibilidade de utilizar o material residual em produtos com viabilidade econômica (HUANG, 2005; JAGABA, 2022). As forrageiras têm potencial para produção de energia a partir da biomassa lignocelulósica, o que agrega sustentabilidade e valor econômico ao sistema produtivo (EMBRAPA, 2010).

Apesar da toxicidade do poluente ser um fator limitante para plantas que não o degradam com facilidade, algumas plantas possuem mecanismos de tolerância e podem imobilizar e/ou acumular o contaminante sem prejuízos ao seu desenvolvimento. (KHAN et al., 2013; RHEN, 2021).

3.2 Análise dos açúcares solúveis totais, clorofilas e carotenoides

Os teores de clorofila a e b apresentados na Figura 3, foram alternados de acordo com a espécie e com o contaminante. *Z. mays* (45,37% e 59,51%) e *P. maximum* (74,32%, 58,52%) aumentou, enquanto a *B. ruziziensis* reduziu 12,84% o teor das clorofilas a e b na maior dose de óleo diesel. O *S. bicolor* reduziu 69,51% o teor de clorofila a na maior concentração enquanto o teor de clorofila b aumentou 36,40% comparado ao controle. O *P. glaucum* não diferenciou estatisticamente na presença do óleo diesel.

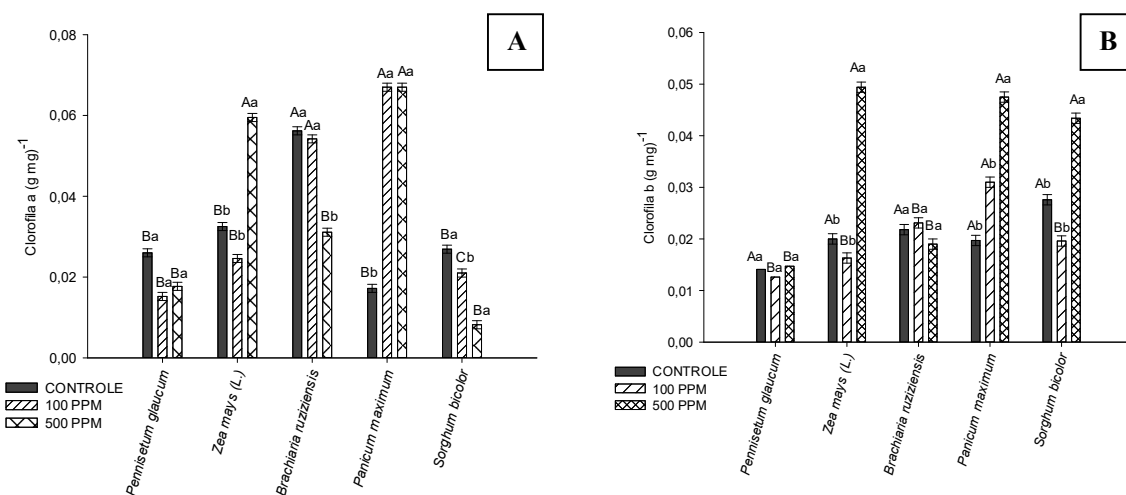


Figura 3 Teor de clorofila a (A) e clorofila b (B) de espécies forrageiras submetidas a solo contaminado por óleo diesel. Diferentes letras maiúsculas indicam diferenças significativas diferentes espécies e letras minúsculas indicam diferenças significativas entre a exposição aos contaminantes ($p \leq 0,05$). Todos os dados são apresentados como média \pm desvio padrão ($n=4$).

A clorofila a, é um importante indicador das reações das plantas sob condições de estresses ambientais (DONG et al., 2014). A redução dessa clorofila na espécie *Brachiaria ruziziensis* sugere uma inibição no fluxo de elétrons do fotossistema II. Derivados de petróleo são conhecidos por impedir o transporte de elétrons da PSII para PSI, resultando em centros de reação de PSII supersaturados, que por sua vez induzem a oxidação fotoquímica dos coletores deluz que ligam a clorofila b.

Assim o aumento do teor de clorofila a e b que ocorre nas espécies *Z. mays* e *P. maximum*, sugere que mudanças ambientais podem limitar o transporte dos contaminantes das raízes para a parte aérea e proteger as partes superiores da planta, onde ocorre a fotossíntese, sendo o teor de clorofila na folha um indicador fisiológico confiável do estado da planta (HUANG et al., 2004; HAMANN et al., 2018).

Os valores de clorofila total (Figura 5A) aumentaram em 73,18% e 69,19% na espécie *P. maximum* em 100 e 500ppm, respectivamente. Para o *Z. mays* a clorofila total aumentou 57,28% na maior concentração de óleo diesel. Para as demais espécies testadas não houve diferença significativa na presença ou ausência do óleo diesel.

O teor de carotenoides apresentada na figura 5B, aumentou 85,47% para a espécie *B. ruziziensis* e 83,69% para *S. bicolor* na concentração de 500 ppm. *P. maximum* reduziu a

síntese de carotenoides nas duas concentrações propostas, 61,98% (100ppm) e 70% (500 ppm). Para as demais espécies não houve diferença significativa entre tratamento e testemunhas.

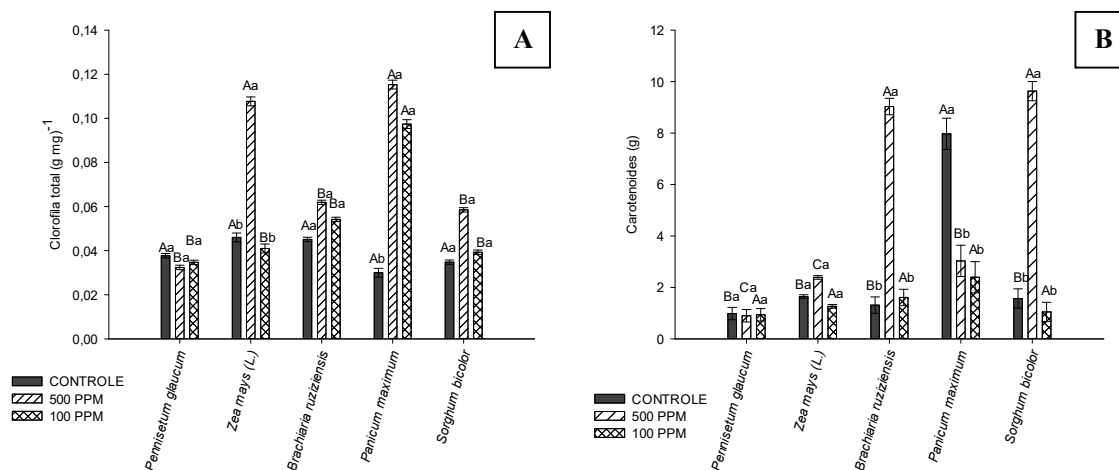


Figura 4 Teor de clorofila total (A) e carotenoides (B) de espécies forrageiras submetidas a solo contaminado por óleo diesel. Diferentes letras maiúsculas indicam diferenças significativas entre espécies e letras minúsculas indicam diferenças significativas entre a exposição aos contaminantes ($p \leq 0,05$). Todos os dados são apresentados como média \pm desvio padrão ($n=4$).

O conteúdo de clorofila nos tecidos foliares é importante para a atividade fotossintética e é muitas vezes utilizado como um indicador de estresse ambiental para algumas espécies (HUANG et al., 2004). O aumento de mais de 50% no teor de clorofila da espécie *Z. mays* e *P. maximum* pode ser indicativo da presença dos compostos do óleo diesel.

Ainda é possível que esse significativo aumento no conteúdo de clorofila nas plantas com o óleo diesel esteja associado a um fenômeno conhecido como hormese, termo que descreve o estímulo de um composto tóxico em baixas concentrações no desenvolvimento vegetal, nesse sentido o diesel pode estimular a fotossíntese além da produção de biomassa e proteínas nas plantas (BELZ & DUKE, 2014; ASADUZZAMAN et al., 2021).

Os carotenoides possuem papel importante na proteção de pigmentos fotossintéticos além da função fotoprotetora, o incremento de carotenoides nas espécies *B. ruziziensis* e *S. bicolor* pode estar relacionado a eficiência do sistema antioxidante dessas espécies (ALMEIDA et al., 2017; SACCON et al., 2019).

A análise de quantidade de açúcares totais das espécies (Tabela 2) nos mostra que exceto *P. glaucum* e *Z. mays*, as demais espécies tiveram seus conteúdos de açúcares solúveis

totais reduzidos na presença do poluente. A forrageira *B. ruziziensis* reduziu 86,64% e 91,22%, *P. maximum* 91,34% e 94,97% e *S. bicolor* 84,60% e 82,28% na concentração de 500ppm e 100ppm, respectivamente.

Tabela 2 Quantidade de açúcares solúveis totais (g) em espécies forrageiras cultivadas em solos com óleo diesel.

| Tratamento | Controle | 500ppm | 100ppm |
|-------------------------------|----------|--------|--------|
| <i>Pennisetum glaucum</i> | 1,07Ca | 0,28Aa | 0,82Aa |
| <i>Zea mays</i> | 0,68Ca | 0,73Aa | 0,53Aa |
| <i>Brachiaria ruziziensis</i> | 10,71Aa | 1,43Ab | 0,94Ab |
| <i>Panicum maximum</i> | 10,74Aa | 0,93Ab | 0,54Ab |
| <i>Sorghum bicolor</i> | 6,04Ba | 0,93Ab | 1,07Ab |

As letras maiúsculas diferem nas colunas e as minúsculas na linha, Coeficiente de variação (%): 24,41.

A redução do teor de açúcares totais nas espécies *B. ruziziensis*, *P. maximum* e *S. bicolor*, resulta na limitação da utilização da biomassa para fins energéticos, o conteúdo pode ser perdido perante a exposição das espécies ao óleo diesel e a composição da matéria-prima influencia diretamente no rendimento da produção da energia (KAWAHIGASHI et al., 2013).

As demais espécies, quais não variaram significativamente com o óleo diesel, podem ser consideradas potenciais para produção de biocombustível de segunda geração, entretanto, é necessário analisar a composição da biomassa lignocelulósica (SILVA, 2019).

4. CONCLUSÕES

Esta pesquisa foi importante para a compreensão dos efeitos do óleo diesel nas espécies forrageiras selecionadas. O *Z. mays* e *B. ruziziensis* foram as espécies mais sensíveis ao óleo diesel, enquanto *S. bicolor* e *P. maximum* foram as espécies que apresentaram maior potencial de tolerância a solos contaminados por óleo diesel.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Ana Catarina et al. Oxidative stress in the algae *Chlamydomonas reinhardtii* exposed to biocides. **Aquatic toxicology**, v. 189, p. 50-59, 2017.

ASADUZZAMAN, M.D. et al. Paraquat resistance and hormetic response observed in *Conyza sumatrensis* (Retz.) E. Walker (tall fleabane) in Australian cotton cropping systems. **Phytoparasitica**, p. 1-11, 2021.

ASSADOLLAHI, A. et al. Using maize (*Zea mays* L.) and sewage sludge to remediate a petroleum-contaminated calcareous soil. **Soil and Sediment Contamination: An International Journal**, v.25, n.1, p. 26-37, 2016.

BAOUNE, H. et al., Effectiveness of the *Zea mays-Streptomyces* association for the phytoremediation of petroleum hydrocarbons impacted soils. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.184, p. 1-8, 2019.

BARRUTIA, O. et al., Antioxidative response, phytochelatin production and photoprotective pigments composition of *Brachiaria decumbes* Stapf plants exposed to Cd and Zn. **Química Nova**, v.34, 2011.

BELZ, R.G.; DUKE, S.O. Herbicides and plant hormesis. **Pest. Management Science**, v.70, n.5, p.698-707, 2014.

BRITO, G.C.B. et al., Estudo de Microrganismos presentes em uma área contaminada por gasolina comercial. **Revista de Estudos Ambientais**, v.12, p.38-46, 2010.

CAI, B. et al., Comparasion of phytoremediation, bioaugmentation and natural attenuation for remediating saline soil contaminated by heavy crude oil. **Biochemical Engineering Journal**, v. 122, p.170-177, 2016.

CONAMA, Resolução nº 357 de 17 de março de 2005. Acesso: 16/11/2022.

COSTA, S. M. S. P. Avaliação do potencial de plantas nativas do Brasil no tratamento de esgoto doméstico e efluentes industriais em wetlands construídos. 119 f. **Tese de Doutorado**. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

DONG, T.; WANG, F.; XU, G. Theoretical and experimental study on the oil sorption behavior of kapok assemblies, **Industrial Crops and Products**, v.61, p.325-330, 2014.

DUDAI, N. et al., Agronomic and economic evaluation of Vetiver grass (*Vetiveria zizanioides* L.) as means for phytoremediation of diesel polluted soils in Israel. **Journal of Environmental Management**, v.211, p.247-255, 2018.

HAIDER, F.U. et al., Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.211, v.15, 2021.

HAMANN, F.A et al., Monitoring physiological and biochemical responses of two apple cultivars to water supply regimes with non-destructive fluorescence sensors, **Scientia Horticulturae**, v.242, p.51-61, 2018.

HUANG, X.D. et al., Responses of three grass species to creosote during phytoremediation. **Environmental Pollution**, v.130, p.453-463, 2004.

EMBRAPA. A importância da lignina para a produção de etanol de Segunda geração, **EMBRAPA Milho e Sorgo**, 2010.

ESTRELA, M.A.; CHAVES, L.H.G.; SILVA, L. Fitorremediação como solução para solos contaminados por metais pesados. **Revista Ceuma Perspectivas**, v. 31, n. 1, p. 160-172, 2018.

JAGABA, A.H. et al. Diverse sustainable materials for the treatment of petroleum sludge and remediation of contaminates sites: A review. **Cleaner Waste Systems**, v.2, 2022.

KAWAHIGASHI, H. et al., Evaluation of brix and sugar content in stem juice from sorghum varieties. **Japanese Society of Grassland Science**, v.59, p.11-19, 2013.

KHAN S.; AFZAL, M.; IQBAL, S.; KHAN, Q. Plant–bacteria partnerships for the remediation of hydrocarbon contaminated soils. **Chemosphere**, v.90, p.1317–1332, 2013.

LIAO, C. et al., Biosurfactant-enhanced phytoremediation of soils contaminated by crude oil using maize (*Zea mays* L.), **Ecological Engineering**, v.92, p.10-17, 2016.

LICHTENTHALER, H.K. Chlorophyll and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods in Enzymology** ed. 148, p.331-382, 1987.

LICHTENTHALER, H.K.; WELLBURN, A. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. **Biochemical Society Transactions** v. 603, p.591-592, 1983.

MERKL, N.; SCHULTZE-KRAFT, R.; INFANTE, C. Phytoremediation in the tropics the effect of crude oil on the growth on tropical plants. **Journal of Bioremediation & Biodegradation**, v.8, p. 177-184, 2004.

SACCON, F. et al. Spectroscopic properties of violaxanthin and lutein triplet states in LHCII are independent of carotenoid composition. **The Journal of Physical Chemistry B**, v. 123, n. 44, p. 9312-9320, 2019.

SHAHZAD, A.; SADDIQUI, S.; BANO, A. The response of maize (*Zea mays* L.) plant assisted with bacterial consortium and fertilizer under oily sludge. **International Journal of Phytoremediation**, v. 18, n. 5, p. 521-523, 2016.

SILVA, C.T. Potencial fitorremediador de plantas de cobertura e produção de bioetanol. **Tese de Doutorado**, 2019.

SILVA, D.C. et al., Removal of oil from produced water by ionic flocculation using saponified babaçu coconut oil. **Journal of Materials Research and Technology**, v.9, p.4476-4484, 2020.

TONEL, F. Fitorremediação a compostos derivados de petróleo. **Tese de Doutorado**, 2014.

VOCCIANTE, M. et al., Enhancements in phytoremediation technology: Environmental assessment including different options of biomass disposal and comparison with a consolidated approach. **Journal of Environmental Management**, 2019.

YOUSAF, U. et al. Interactive effect of biochar and compost with Poaceae and Fabaceae plants on remediation of total petroleum hydrocarbons in crude oil contaminated soil. **Chemosphere**, v.286, 2022.

WANG, X.; BARTHA, R. Effects of bioremediation on residues, activity and toxicity in soil contaminated by fuel spills. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 22, p.501-505, 1990.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados desta pesquisa ressaltam a complexidade das interações entre poluentes, plantas e o solo. Diversos fatores, como a extensão da contaminação e a capacidade de retenção do solo, podem influenciar a resposta das plantas. Essa variabilidade pode afetar de maneiras distintas o comportamento das plantas, sua capacidade de tolerância e remediação.

As espécies utilizadas na pesquisa demonstraram não apenas tolerância, mas também potencial para prosperar em ambientes contaminados, oferecendo possíveis oportunidades para a produção de etanol de segunda geração. A continuidade da pesquisa é crucial, pois a descoberta de microorganismos que facilitem o processo de degradação, bem como sua interação com as plantas, pode conduzir a abordagens mais eficientes e eficazes para a recuperação ambiental.