PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS E ADSORÇÃO BIOLÓGICA NO TRATAMENTO DE EFLUENTES: A IMPORTÂNCIA DO SISTEMA MULTI BARREIRAS

Palavras-Chave: TRATAMENTO, REÚSO, BIOINDICADORES, BIOLUMINESCÊNCIA, EFLUENTES.

Tácio Mendes dos Santos Felix[1], Iure Bernardino de Sousa[1], Jacqueline Aparecida Malvestiti[1-2], Rodrigo Pereira Cavalcante[1], Cristiano de Mello Gallep[1], Renato Falcão Dantas[1]

(1) *Universidade Estadual de Campinas* (UNICAMP), *Faculdade de Tecnologia* (FT), R. Paschoal Marmo 1888, 13484332, Limeira, SP, Brazil. (2) Center for Nuclear Energy in Agriculture (CENA), University of São Paulo (USP), Av. Centenário 303, 13400970, Piracicaba, SP, Brazil.

1. INTRODUÇÃO

A escassez hídrica crescente tem incentivado o reúso de águas residuárias na agricultura, responsável por cerca de 70% do consumo global de água doce (Li et al., 2024). Além de aliviar a pressão sobre fontes convencionais, essa prática permite o reaproveitamento de nutrientes presentes nos efluentes (Ait-Mouheb et al., 2018; Haddon et al., 2023).

Entre as alternativas mais eficientes estão os Processos Oxidativos Avançados (POAs) (Kamalesh et al., 2024; Boluoch et al., 2024). Contudo, o uso isolado desses processos pode gerar subprodutos tóxicos. A combinação com a filtração biológica em carvão ativado (BAC) tem se mostrado eficaz ao aliar adsorção e biodegradação (Rueda-Márquez et al., 2015; Medeiros & Montagner, 2024).

Os efeitos fisiológicos desses tratamentos sobre as plantas ainda são pouco explorados. Neste contexto, este estudo investigou os impactos das configurações O_3, BAC e suas combinações no desenvolvimento de *Triticum aestivum*, utilizando parâmetros morfológicos e a emissão de bioluminescência biológica autoinduzida (BAL) como indicador precoce de estresse.

2. METODOLOGIA

A metodologia adotada permitiu avaliar os efeitos de diferentes tratamentos de efluente sobre o desenvolvimento de plântulas de trigo e sua resposta fisiológica por meio da emissão de bioluminescência biológica autoinduzida (BAL).

2.1. Processos de Tratamento de Efluentes

Foram aplicados três tipos de tratamento: (i) ozonização (O_3); (ii) filtração com BAC e (iii) sistemas combinados: O_3-BAC, BAC-O_3 e O_3-BAC-O_3.

2.2. Teste Crônico e Agudo de Germinação

No teste crônico foram dispostas 25 sementes por placa de Petri, com aplicação de 5 mL de efluente tratado. O controle usou água destilada. As placas foram incubadas por 72 h a 24 °C em câmara escura. Após o período, mediram-se o comprimento radicular e a biomassa. Os testes foram realizados em duplicata para cada condição.

No teste agudo as sementes foram pré-germinadas com água destilada por 48 h e então expostas aos efluentes por 24 h. Após o contato, foram feitas as mesmas medições biométricas e o registro da bioluminescência.

As emissões foram registradas em duas câmaras escuras com fotomultiplicadoras (PMT), com tempo de integração de 10s. Os sinais foram suavizados por média local e comparados ao controle. Foram analisados valores totais de emissão e, quando presentes, picos específicos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Testes Agudos na Germinação do Trigo

Os testes agudos avaliaram a resposta inicial das plântulas de trigo à exposição aos efluentes tratados, com a emissão ultra-fraca de fótons (UPE) usada como indicador de estresse metabólico. A Figura 1 apresenta a evolução da UPE em 24 horas (painéis superiores) e a distribuição dos comprimentos radiculares após o teste (painéis inferiores).

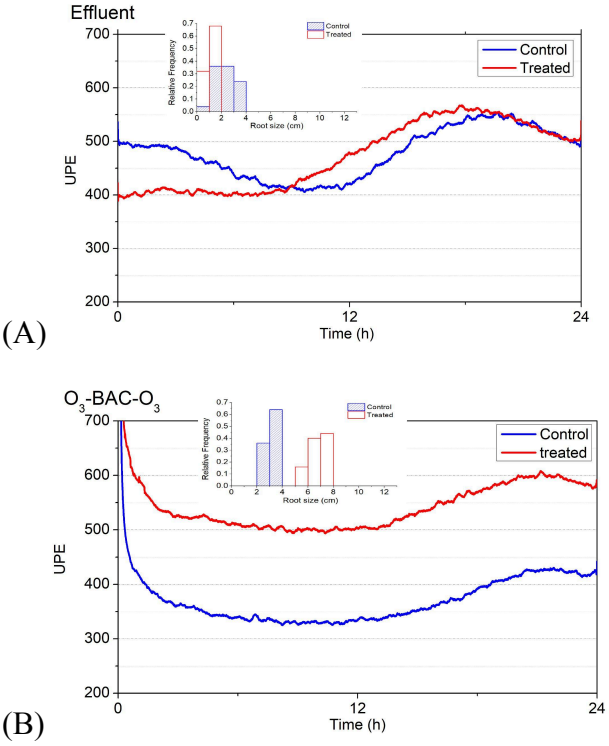

Figura 1. Curso temporal da emissão de UPE em Triticum aestivum e distribuição do crescimento radicular sob condições de estresse agudo: (A) Efluente bruto e (B) O_3–BAC–O_3

O efluente bruto provocou um estresse prolongado, evidenciado por elevados níveis de UPE e inibição severa do crescimento radicular, com raízes inferiores a 2 cm, reflexo da alta carga orgânica e da presença de micropoluentes tóxicos (Ahmad et al., 2022). O O_3 isolado intensificou o pico de emissão de fótons, indicando geração de compostos pró-oxidantes, como aldeídos, que ainda limitaram o

desenvolvimento radicular, apesar da redução parcial da toxicidade.

O tratamento isolado por filtração em BAC resultou em níveis mais baixos de UPE e crescimento radicular moderado (3 a 4 cm), sugerindo maior eficiência na remoção dos contaminantes tóxicos. A combinação BAC-O_3 promoveu ainda menor estresse oxidativo, com raízes mais alongadas (~5 cm). Já o sistema O_3-BAC apresentou uma resposta bimodal, indicando a presença de subgrupos de plântulas sob estresse e outros com crescimento normal, refletindo a complexidade da interação entre os processos.

O tratamento triplo O_3-BAC-O_3 demonstrou o melhor desempenho, caracterizado por um pico transitório de UPE seguido de rápida estabilização, associado a um crescimento radicular superior (6 a 8 cm), ultrapassando até mesmo o controle irrigado com água destilada. Isso sugere que a sequência completa promoveu uma detoxificação eficiente, aliada a um estímulo metabólico controlado, favorecendo o desenvolvimento saudável das plântulas.

A análise da correlação entre a emissão de fótons e o comprimento radicular indicou que tratamentos com alta emissão inicial, como o O_3 isolado e BAC-O_3, estiveram associados a maior toxicidade. Em contraste, o sistema O_3-BAC-O_3 equilibrou a resposta antioxidante da planta, promovendo maior acúmulo de biomassa, o que pode indicar um efeito bioestimulante decorrente dos compostos residuais gerados ao longo do tratamento.

3.2 Teste Crônico no Trigo

Nos testes de exposição prolongada, os efeitos fisiológicos dos tratamentos sobre as plântulas foram avaliados com base na mesma abordagem. A Figura 2 mostra a evolução da emissão de UPE (painéis superiores) e a distribuição dos comprimentos radiculares após o período de 72 horas (painéis inferiores).

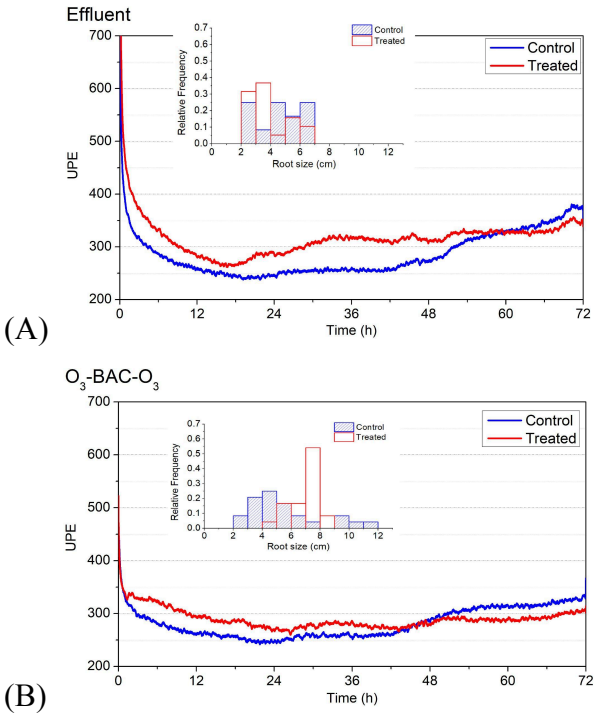

Figura 2. Curso temporal da emissão de UPE em Triticum aestivum e distribuição do crescimento radicular sob condições de estresse crônico: (A) Efluente bruto e (B) O_3–BAC–O_3

O tratamento O_3-BAC-O_3 destacou-se novamente por apresentar baixos níveis de emissão de fótons, concomitantes ao maior comprimento radicular médio (~16 cm), demonstrando a eficácia na remoção de compostos tóxicos e no fornecimento de nutrientes residuais que beneficiaram o crescimento das raízes (Mainardis et al., 2022).

Em contraste, os tratamentos com BAC e BAC-O_3 apresentaram emissões elevadas de UPE, apesar do crescimento radicular razoável. Isso indica que, embora esses tratamentos removam muitos contaminantes, ainda permanecem substâncias pró-oxidantes ou subprodutos de difícil degradação que elevam o estresse metabólico da planta. A O_3 isolada, por sua vez, manteve níveis altos de emissão e apresentou baixo desenvolvimento radicular, evidenciando estresse metabólico agudo com comprometimento fisiológico significativo (Margot et al., 2012).

O sistema O_3-BAC teve desempenho intermediário, com emissões moderadas de UPE e ganho de biomassa superior ao O_3 isolado, porém inferior ao O_3-BAC-O_3. Já o efluente bruto causou crescimento limitado e níveis moderados de emissão, indicando um estresse "silencioso" que inibe o desenvolvimento sem ativar defesas metabólicas eficazes.

As distribuições dos comprimentos radiculares confirmaram a superioridade do sistema O_3-BAC-O_3, que proporcionou um desenvolvimento mais uniforme e vigoroso das plântulas. Os tratamentos com BAC e BAC-O_3 também apresentaram crescimento razoável, porém com maior variabilidade e sinais de estresse metabólico. O controle e o efluente bruto exibiram distribuições radiculares mais dispersas, associadas a limitações fisiológicas.

Além disso, a taxa de germinação foi significativamente maior nos tratamentos combinados, destacando-se o O_3-BAC-O_3, que atingiu cerca de 100%, indicando que a sequência oxidação–adsorção–oxidação é eficaz na redução de compostos fitotóxicos e na promoção do desenvolvimento saudável das plantas. A inversa correlação entre a emissão de fótons e a germinação reforça que o estresse metabólico foi minimizado neste sistema.

Assim, os resultados demonstram que o tratamento sequencial O_3-BAC-O_3 é o mais eficiente para garantir a segurança e a qualidade do efluente para reúso agrícola, combinando baixa toxicidade, excelente desempenho fisiológico e potencial efeito bioestimulante sobre as plântulas de trigo.

4. CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou que o tipo e a sequência de tratamento dos efluentes impactam diretamente o desenvolvimento de Triticum aestivum. A combinação de parâmetros morfológicos e da emissão de fótons ultra-fracos (UPE) revelou-se eficiente para detectar estresse fisiológico de forma sensível e não invasiva.

O O_3 causou estresse oxidativo elevado, enquanto o BAC favoreceu o crescimento, apesar de possíveis respostas metabólicas associadas a nutrientes residuais. As combinações BAC–O_3 e O_3–BAC apresentaram desempenho intermediário, mas o sistema O_3–BAC–O_3 se destacou, promovendo maior crescimento e menor estresse, com resultados superiores até ao controle.

Nos testes crônicos, observou-se menor diferença entre os tratamentos, sugerindo aclimatação das plantas — o que reforça o valor dos testes agudos para detectar efeitos iniciais.

Conclui-se que o sistema O_3–BAC–O_3 é uma alternativa promissora para o reúso agrícola de efluentes, e que a UPE se configura como uma ferramenta inovadora para monitoramento fisiológico vegetal em práticas de agricultura regenerativa e manejo sustentável da água.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (2022/04015-1, 2022/00454-0, 2019/26210-8) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (403211/2023-9, 301765/2022-7) pelo apoio financeiro.

BIBLIOGRAFIA

AIT-MOUHEB, N. et al. The reuse of reclaimed water for irrigation around the Mediterranean Rim: a step towards a more virtuous cycle? Regional Environmental Change, v. 18, n. 3, p. 693–705, 2018. https://doi.org/10.1007/s10113-018-1292-z

HADDON, A., RAPAPORT, A., ROUX, S., & HARMAND, J. Model based optimization of fertilization with treated wastewater reuse. Advances in Water Resources, v. 181, p. 104561, 2023. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2023.104561

KAMALESH, R. et al. Emerging breakthroughs in membrane filtration techniques and their application in agricultural wastewater treatment: Reusability aspects. Sustainable Chemistry for the Environment, v. 8, 2024. DOI: 10.1016/j.scenv.2024.100183.

LI, M., YANG, X., WANG, K., DI, C., XIANG, W., & ZHANG, J. Exploring China's water scarcity incorporating surface water quality and multiple existing solutions. Environmental Research, v. 246, p. 118191, 2024. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118191

MAINARDIS, M., CECCONET, D., MORETTI, A., CALLEGARI, A., GOI, D., FREGUIA, S., & CAPODAGLIO, A. G. Wastewater fertigation in agriculture: Issues and opportunities for improved water management and circular economy. Environmental Pollution, v. 296, p. 118755, 2022. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118755

MEDEIROS, J.; MONTAGNER, C. C. Multiple barriers as an efficient treatment for removing pesticides aiming direct potable reuse: A pilot scale study. Environmental Pollution, v. 350, p. 124009, 2024. DOI: 10.1016/j.envpol.2024.124009.

Rueda-Márquez, J. J. et al. Combined AOPs for potential wastewater reuse or safe discharge based on multi-barrier treatment (microfiltration-H_2O_2/UV-catalytic wet peroxide oxidation). Chemical Engineering Journal, v. 270, p. 80-90, 2015. DOI: 10.1016/j.cej.2015.02.011.