


# BIOMASSA FERMENTADA DE *Ganoderma lucidum* APLICADA À DESCOLORAÇÃO DE CORANTE SINTÉTICO ASSISTIDA POR RADIAÇÃO MICRO-ONDAS

Alisson S. da S. Quinto[1]; Júlia L. Nascimento[1]; Rafael R. Teixeira[1]; Adriana B. Pimentel[1]; Marise S. de Carvalho[1]; Gabriel L. S. de Jesus[1]; Izis R. A. S. Vieira[1]; Marcelo Franco[1]

*[1]Grupo de Pesquisa em Biotransformação e Biocatálise Orgânica, Departamento de Ciências Exatas, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus-BA, Brasil.*
*julialima0390@gmail.com*

**Palavras-Chave**: Biorremediação, Lacase, Corantes têxteis.

## Introdução

O descarte inadequado de efluentes industriais contendo corantes sintéticos representa um grande problema ambiental, devido à elevada estabilidade química, resistência e toxicidade desses compostos no ecossistema aquático. Além de comprometerem a qualidade da água, esses corantes reduzem a penetração de luz, prejudicando a fotossíntese dos organismos aquáticos, podendo causar desequilíbrios ecológicos e apresentar efeitos tóxicos para diferentes níveis da cadeia alimentar (Siddiqui et al., 2022). Dentre as classes de poluentes orgânicos de difícil remoção, destaca-se o Azul de Coomassie Brilhante (ACB), um corante derivado do trifenilmetano amplamente utilizado em pesquisas biotecnológicas e na indústria têxtil. Devido à sua estrutura molecular complexa e aromática, o ACB apresenta alta resistência aos métodos de tratamento biológico convencionais, como o sistema de lodos ativados, demandando o desenvolvimento de tecnologias avançadas que promovam a degradação eficiente da sua estrutura (Al-Gheethi et al., 2024).

Nesse contexto, a aplicação de fungos basidiomicetos e seus complexos enzimáticos ligninolíticos surge como uma alternativa ecologicamente viável e promissora frente aos tratamentos físico-químicos tradicionais, que frequentemente geram lodo secundário tóxico (KUHAR et al., 2025). O fungo *Ganoderma lucidum* destaca-se nesse cenário por sua elevada capacidade de secreção de lacases, enzimas capazes de oxidar uma ampla gama de compostos fenólicos e não fenólicos sem a necessidade de cofatores dispendiosos (Nawaz et al., 2023). Ademais, a utilização da própria biomassa fúngica cultivada em resíduos agroindustriais, como o bagaço de cana-de-açúcar, elimina as etapas caras de extração e purificação enzimática, configurando um sistema de baixo custo alinhado aos princípios da bioeconomia circular e valorização de resíduos (Almeida et al., 2025; Santos et al., 2026).

No entanto, os processos de biorremediação puramente biológicos ou enzimáticos frequentemente demandam longos tempos de tratamento, o que limita sua eficiência e viabilidade para uma aplicação em maior escala. Assim, a integração da radiação por micro-ondas como fonte de aquecimento rápido e homogêneo tem sido investigada para acelerar processos biocatalíticos. Quando aplicada sob condições brandas e estritamente controladas, a energia de micro-ondas induz efeitos térmicos e não térmicos que podem alterar a estrutura de materiais biológicos, aumentando a movimentação molecular e favorecendo o contato entre a enzima e o substrato e, consequentemente, elevando a velocidade de transformação sem promover a desnaturação térmica precoce das proteínas envolvidas (Oliveira et al., 2024).

Diante disso, este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência da biorremediação do corante sintético Azul de Coomassie Brilhante (ACB) utilizando a biomassa de bagaço de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) fermentada por *Ganoderma lucidum*, investigando o efeito sinérgico da radiação de micro-ondas como agente acelerador e intensificador do bioprocesso.

## Material e Métodos

### *Ensaios de descoloração assistida por micro-ondas*

A biorremediação do Azul de Coomassie Brilhante (ACB) foi avaliada utilizando biomassa de bagaço de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) fermentada por *Ganoderma lucidum (F)*, contendo lacase e aplicada sem extração enzimática prévia, em comparação à biomassa não fermentada (NF). Os ensaios foram conduzidos com 150 mL de solução aquosa de ACB a 20 mg $L^{-1}$.

As biomassas foram adicionadas nas proporções de 2, 6 e 10% (m/v). O tratamento por micro-ondas (M) foi realizado no reator Milestone flexiWAVE (Sorisole, Itália), com potência de 400 W e duração total de 10 minutos: rampa de aquecimento nos primeiros 5 minutos e manutenção a 40 °C nos 5 minutos finais. Ao término do tratamento, as amostras foram coletadas para as análises subsequentes.

### *Determinação da atividade enzimática*

A atividade da lacase foi determinada por espectrofotometria a 470 nm, pela oxidação do guaiacol (Chance e Maehly, 1955). O meio reacional foi composto por 0,75 mL de tampão acetato de sódio 100 mM (pH 5,0), 0,5 mL de extrato enzimático (EM) e 0,75 mL de guaiacol

100 mM. A mistura foi incubada a 28 °C por 30 minutos. Uma unidade de atividade (U) correspondeu à oxidação de 1 µmol de guaiacol por minuto, utilizando o coeficiente de extinção molar do produto oxidado (Tatarko e Bumpus, 1998). A atividade foi expressa em U $L^{-1}$.

*Monitoramento espectrofotométrico e cromatográfico (HPLC).*

Após filtração, as amostras foram analisadas por UV-Vis (Nova NI 1600 UV), com varredura de 190 a 1100 nm para determinar o comprimento de onda de máxima absorção. A descoloração foi monitorada a 602 nm (Bel Photonics SF200DM).

A investigação de possíveis alterações no perfil do corante foi realizada por Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (CLAE), em equipamento Shimadzu LC-20, com bomba de gradiente binário, detector de arranjo de diodos (DAD) e desgaseificador DGU-20A3 (Shimadzu, Japão). Utilizou-se coluna Nucleosil ODS C18 (4,6 × 150 mm; 5 µm; Macherey-Nagel), à temperatura ambiente, e metanol de grau HPLC (>99,9%; Sigma-Aldrich) como fase móvel isocrática, com fluxo de 1 mL $min^{-1}$, injeção de 20 µL e corrida de 5 minutos por amostra (Kumar et al., 2025).

*Delineamento experimental e análise de dados.*

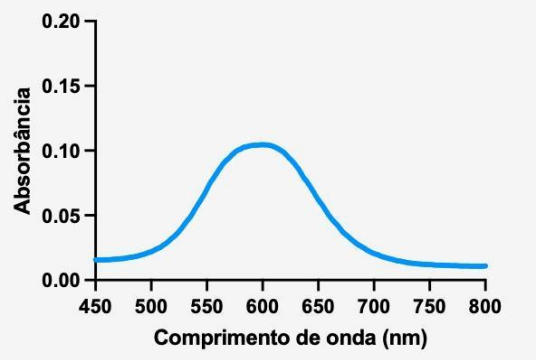
Todos os ensaios experimentais (determinação da atividade enzimática, ensaios de descoloração e análises cromatográficas) foram realizados em triplicata. Os dados foram expressos como média ± desvio-padrão (DP), utilizando-se o erro-padrão da média (EPM) nos gráficos de descoloração e concentração residual do corante (Figura 3). As estatísticas descritivas foram calculadas no Microsoft Excel e os gráficos elaborados no GraphPad Prism 8.02.

**Resultados e Discussão**

A avaliação inicial da solução aquosa do corante Azul de Coomassie Brilhante (ACB) por espectrofotometria UV-Vis mostrou um pico de máxima absorção em 602 nm, característico de sua estrutura molecular aromática. Como mostrado na Figura 1, o acompanhamento dessa banda espectral foi utilizado como principal parâmetro analítico para avaliar a eficiência do tratamento de biorremediação assistido por radiação micro-ondas, utilizando o espectro de varredura do corante controle na concentração de 20 $mg.L^{-1}$.

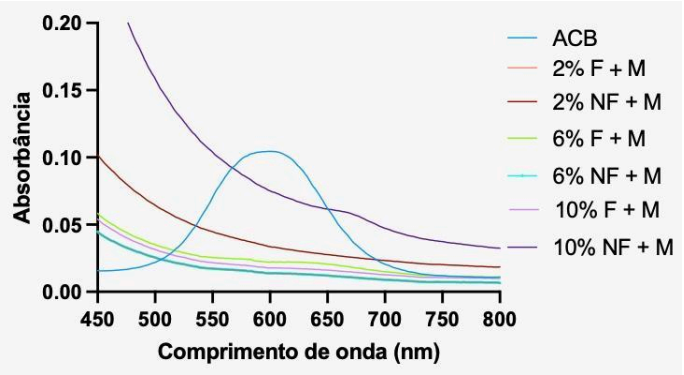
A identificação do comprimento de onda de máxima absorção permitiu selecionar o parâmetro mais adequado para o monitoramento da descoloração do corante. As variações na absorbância em 602 nm foram utilizadas para acompanhar a eficiência dos tratamentos aplicados ao ACB, permitindo comparar o desempenho dos diferentes sistemas avaliados.

**Figura 1:** Espectro de varredura do corante Azul de Coomassie Brilhante em concentração de 20 mg $L^{-1}$.




Sabendo que o decréscimo da absorbância nesse comprimento de onda indica diretamente a remoção ou a descoloração do corante no meio reacional, os ensaios experimentais demonstraram que ambos os tratamentos, utilizando a biomassa não fermentada (NF) e a biomassa fermentada (F) sob as condições operacionais estabelecidas (40 °C, 400 W), promoveram uma redução acentuada na intensidade do pico principal de absorção após a aplicação da radiação micro-ondas, conforme evidenciado no perfil espectrofotométrico geral das amostras tratadas (Figura 2).

**Figura 2:** Perfil espectrofotométrico do ACB após descoloração assistida por radiação micro-ondas.

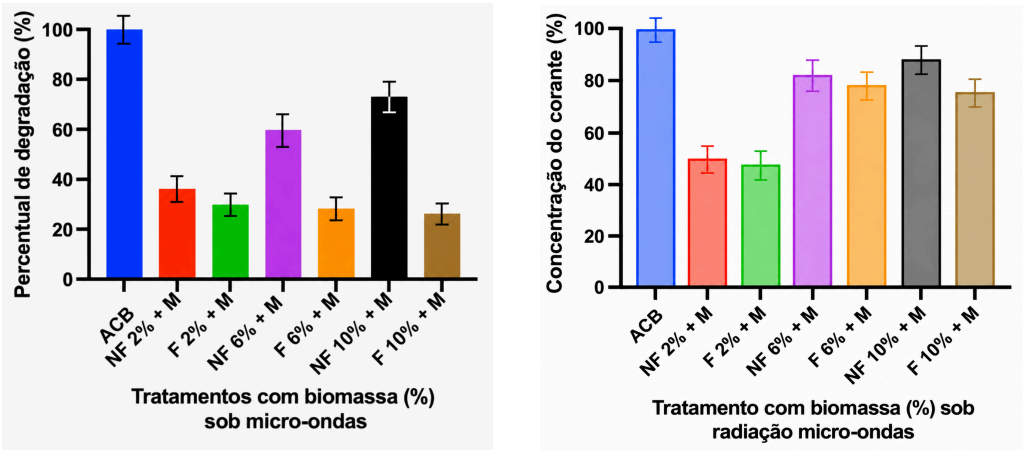



O planejamento experimental Doehlert permitiu estabelecer as condições de produção enzimática por *Ganoderma lucidum*, destacando-se a temperatura de 26 °C, pH 5,0 e umidade de 80% nas quais foram registradas a maior atividade de lacase (358,753u/L). Posteriormente, os ensaios de estabilidade térmica indicaram melhor desempenho aos 80 minutos, na temperatura de 40 °C, selecionada para os tratamentos assistidos por micro-ondas.

A redução da absorbância observada nos ensaios evidencia a descoloração do ACB, que pode estar associada a diferentes mecanismos de remoção. A biomassa não fermentada pode contribuir para a retenção do corante por meio da biossorção (Kerrou et al., 2021), enquanto a biomassa fermentada por *Ganoderma lucidum* pode combinar essa propriedade com possíveis transformações bioquímicas mediadas por enzimas produzidas durante a fermentação (Quinto et al., 2026).

Além disso, o aquecimento por micro-ondas pode influenciar as interações entre a biomassa e o corante. Entretanto, os resultados obtidos não permitem determinar isoladamente a contribuição de cada mecanismo. A avaliação das diferentes dosagens de biomassa demonstrou que a proporção de 2% (m/v) apresentou os menores valores de área cromatográfica relativa ao pico principal do ACB. Os tratamentos com biomassa não fermentada (NF 2% + M) e fermentada (F 2% + M) apresentaram percentuais residuais de 49,62% e 48,99%, respectivamente, correspondendo a reduções de área de 50,38% e 51,01% em relação ao controle, conforme apresentado na Figura 3. Contudo, os resultados espectrofotométricos apresentaram um comportamento distinto para a biomassa fermentada, com maiores percentuais médios de descoloração nas dosagens de 6% e 10%. Dessa forma, foi possível observar que a condição de 2% apresentou o melhor resultado cromatográfico, mas não pode ser considerada a dosagem ótima para todos os parâmetros avaliados.

**Figura 3:** Percentual de transformação e concentração residual do corante após o tratamento com diferentes dosagens de biomassa.

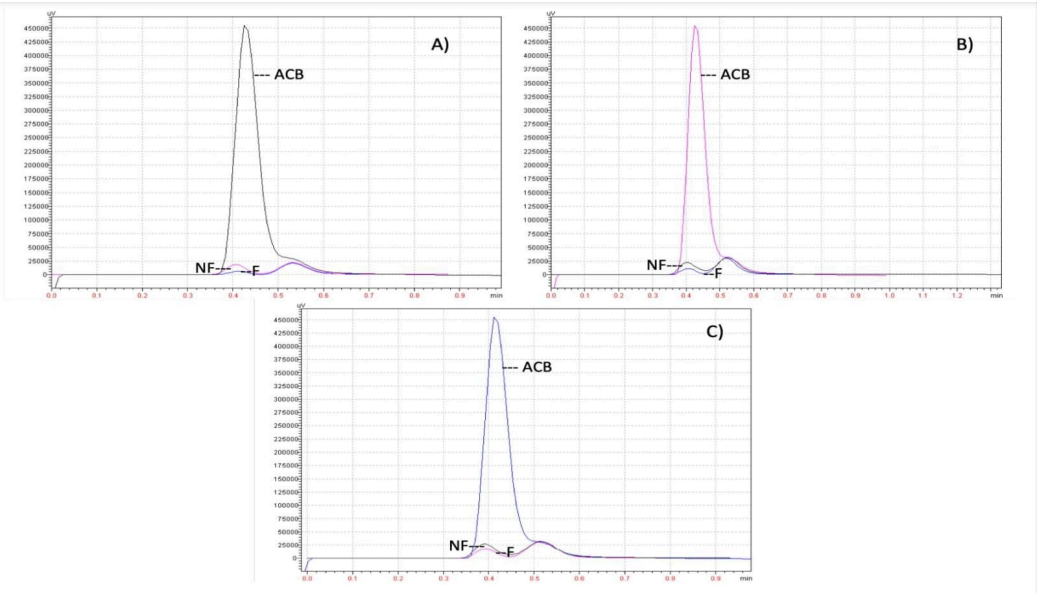



Embora o aumento da quantidade de biomassa possa disponibilizar mais sítios de adsorção e uma maior carga enzimática, o desempenho dos tratamentos depende das condições do sistema e da dosagem utilizada (Kerrou et al., 2021). Concentrações elevadas de sólidos também podem provocar limitações na transferência de massa, dificultando o contato entre o corante e a biomassa. Além disso, as propriedades dielétricas do meio podem influenciar a absorção das micro-ondas e a distribuição da temperatura (Dan et al., 2025).

Esses fatores podem contribuir para explicar as diferenças observadas entre os tratamentos, embora sua influência específica ainda necessite de investigação experimental.

A análise por Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (CLAE) complementou os resultados espectrofotométricos, permitindo avaliar a redução da área do pico principal do ACB e as alterações nos perfis cromatográficos após os tratamentos. As diferenças percentuais entre as técnicas podem estar relacionadas às distintas respostas analíticas, pois o UV-Vis monitora a absorbância em 602 nm, enquanto a CLAE avalia a área do pico atribuído ao corante. Dessa forma, a redução da intensidade da banda espectral não corresponde necessariamente à mesma redução da área cromatográfica, sendo importante a interpretação conjunta dessas análises (Quinto et al., 2026). Embora os percentuais residuais obtidos na dosagem de 2% tenham sido semelhantes entre as biomassas fermentada e não fermentada, observam-se diferenças nos perfis cromatográficos, incluindo a presença de picos secundários, que podem indicar possíveis produtos de transformação do corante (Quinto et al., 2025), conforme apresentado na Figura 4.

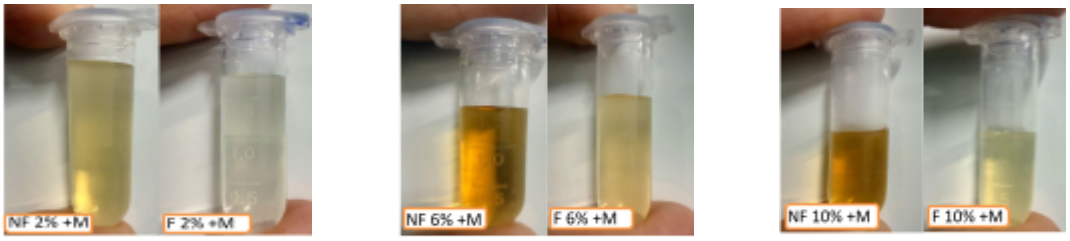
**Figura 4:** Cromatogramas do Azul de Coomassie Brilhante (ACB) após tratamento assistido por micro-ondas com biomassa de cana-de-açúcar fermentada (F) e não fermentada (NF), nas dosagens de A (2%), B (6%) e C (10%) (m/v), em comparação ao corante controle.




A análise cromatográfica mostrou alterações nos perfis das amostras tratadas, incluindo a redução da área do pico principal do ACB e o aparecimento de picos secundários, que podem indicar a formação de produtos de transformação. Quantitativamente, a área do pico principal do corante controle (ACB = 271.650) foi reduzida para 134.782,5 ± 7.699,49 no tratamento NF 2% + M e para 133.089,5 ± 7.065,50 no tratamento F 2% + M. Essas

alterações sugerem a possibilidade de transformação química do corante, embora não permitam confirmar a quebra estrutural da molécula nem determinar a contribuição individual dos mecanismos envolvidos. A identificação dos possíveis produtos formados requer análises complementares, como a espectrometria de massas. Os resultados cromatográficos e espectrofotométricos são complementados pela análise visual das amostras após tratamentos (Figura 5).

**Figura 5:** Aspecto visual das soluções de corante após os tratamentos com diferentes concentrações de biomassa não fermentada (NF) e fermentada (F).




O tubo correspondente ao ensaio conduzido com 2% de biomassa fermentada (F 2% + M) apresentou o aspecto mais translúcido entre os tratamentos biocatalíticos avaliados, evidenciando visualmente a redução da intensidade da coloração, sem comprovar a degradação química do corante. Em contrapartida, as soluções contendo as dosagens de 10% de biomassa mantiveram uma coloração residual intensa e escura, o que pode estar relacionado às características das amostras e às condições do tratamento. Entretanto, essas observações visuais devem ser interpretadas em conjunto com os resultados espectrofotométricos e cromatográficos.

## Conclusões

O presente estudo demonstrou o potencial biotecnológico do uso da biomassa de bagaço de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) fermentada por *Ganoderma lucidum* como um sistema com potencial adsorvente e biocatalítico para a descoloração do corante Azul de Coomassie Brilhante (ACB) assistida por radiação micro-ondas. Os resultados mostraram que o desempenho do bioprocesso é influenciado pela concentração de biomassa, destacando-se a dosagem de 2% (m/v) pela maior redução da área cromatográfica do pico principal do corante, nas condições de 400 W e 40 °C.

Embora ambos os sistemas tenham apresentado reduções semelhantes da área cromatográfica do corante na dosagem de 2%, , as análises por HPLC evidenciaram alterações nos perfis cromatográficos, sugerindo a possibilidade de transformação química do ACB. A biomassa não fermentada pode contribuir por meio da biossorção, enquanto a biomassa fermentada pode combinar esse mecanismo com a possível ação do complexo enzimático, incluindo a lacase. Em concentrações de 6 e 10%, a maior quantidade de biomassa pode influenciar a transferência de massa e a distribuição da energia de micro-ondas, embora esses efeitos ainda precisem de confirmação experimental. Assim, o uso da biomassa fermentada associado à radiação micro-ondas mostrou-se uma estratégia promissora para a descoloração de soluções sintéticas em escala laboratorial. Entretanto, são necessários estudos complementares envolvendo a identificação dos possíveis produtos de transformação, a avaliação da toxicidade, a aplicação em efluentes reais e o escalonamento do processo.

## Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC) e ao Laboratório de Biocatálise e Biotransformação (LaBioCat) pelo apoio e infraestrutura disponibilizada para a realização deste trabalho.

## Referências

AL-GHEETHI, A. et al. Advanced oxidation technologies for triphenylmethane dye degradation in textile wastewater: A comprehensive review. **Journal of Water Process Engineering**, v. 58, p. 104-115, 2024.

ALMEIDA, R. C.; SILVA, M. S. Sugarcane bagasse as a sustainable solid-state matrix for value-added enzyme production by white-rot fungi. **Bioresource Technology Reports**, v. 29, p. 101-112, 2025.

CHANCE, B.; MAEHLY, A. C. Assay of catalases and peroxidases. **Methods in Enzymology**, v. 2, p. 764-775, 1955.

CHEN, L. et al. Thermal and non-thermal microwave effects on fungal enzymatic systems during recalcitrant compound degradation. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v. 47, n. 4, p. 512-525, 2024.

KERROU, M. et al. The use of sugarcane bagasse to remove the organic dyes from wastewater. International **Journal of Analytical Chemistry**, v. 2021, artigo 5570806, 2021. DOI: https://doi.org/10.1155/2021/5570806.

KUHAR, F.; CASTIGLIA, V.; LEVIN, L. Enhancement of laccase production and recalcitrant green dye decolorization by co-culturing white-rot fungi in solid-state fermentation. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 188, p. 55-64, 2025.

KUMAR, A. et al. High-performance liquid chromatography (HPLC) analysis of triphenylmethane dye cleavage products by fungal oxidoreductases. **Chemosphere**, v. 320, p. 138-149, 2025.




LUSSO, M. G.; PASCHOLATI, S. F. Activity and isoenzymatic pattern of soluble peroxidases in maize tissues after mechanical injury or fungal inoculation. **Summa Phytopathologica**, v. 25, n. 3, p. 248-255, 1999.

NAWAZ, M. et al. Evaluation of oxidoreductase laccase of Ganoderma species: Production optimization and eco-friendly removal of synthetic dyes from wastewater. **MDPI Applied Sciences**, v. 14, n. 3, p. 95-108, 2023.

OLIVEIRA, T. M. et al. Microwave-assisted biocatalysis: Thermal and non-thermal microwave effects on fungal enzymatic systems. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v. 47, n. 2, p. 215-227, 2024.

OLIVEIRA, T. M. et al. Mass transfer limitations and mass balances in agro-industrial waste bioreactors under electromagnetic fields. **Biochemical Engineering Journal**, v. 202, p. 109-121, 2026.

QUINTO, A. S. S. et al. Valorization of agri-food by-products for laccase oxidative multienzyme extract production and dye degradation: A sustainable biodegradation approach. **Journal of the Indian Chemical Society**, v. 102, n. 6, artigo 101717, 2025.

QUINTO, A. S. S. et al. Integrated enzymatic–microbial systems for textile wastewater detoxification: Mechanisms, synergies and industrial perspectives. **Biomass**, v. 6, n. 4, artigo 57, 2026.

SANTOS, J. F. et al. Biodegradation of textile dyes by Ganoderma lucidum immobilized on agro-industrial waste. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 48, p. 74-83, 2026.

SIDDIQUI, S. et al. Degradation and detoxification of synthetic dyes with multi-copper oxidases: A review on green treatment. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 13, p. 8150-8165, 2022.

SILVA, A. R. et al. Laccase immobilization on lignocellulosic matrices and its synergistic performance in dye decolorization. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 265, p. 1102-1115, 2025.

TATARKO, M.; BUMPUS, J. A. Biodegradation of a mixture of sulfonated azo dyes by Phanerochaete chrysosporium. **Letters in Applied Microbiology**, v. 26, n. 4, p. 276-280, 1998.

WANG, J. et al. Dielectric properties and electromagnetic shielding effects of high-solid suspension systems in microwave reactors. **Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy**, v. 57, n. 2, p. 89-102, 2023.