



BIOACELERADOR DE DECOMPOSIÇÃO DE TOCOS DE EUCALIPTO: OTIMIZAÇÃO SUSTENTÁVEL PARA REDUÇÃO DE CUSTOS NA DESTOCA

Henrique E. Alt¹; Arthur D. Sivinski¹; Carla K. Ruschel¹

¹Fundação Escola Técnica Liberato Salzano Vieira da Cunha
althenriqueesser22@gmail.com

Palavras-Chave: Bioestimulação, Biodegradação, Bioadição

Introdução

A silvicultura brasileira tem no cultivo de eucalipto um de seus principais pilares econômicos, especialmente para os setores de celulose e energia. Contudo, após a colheita, a permanência prolongada de tocos e sistemas radiculares no solo, decorrente da elevada resistência da biomassa lignocelulósica, representa um entrave ao uso sustentável e à rápida reutilização dessas áreas. Os métodos convencionais de remoção, como a destoca mecânica e a aplicação de agentes químicos, apresentam elevado custo operacional e podem causar impactos ambientais significativos, incluindo compactação do solo, erosão e riscos de contaminação (Foelkel, 2014).

Como alternativa, diferentes estudos têm demonstrado o potencial de fungos ligninolíticos na aceleração da decomposição de tocos de eucalipto por meio da produção de enzimas oxidativas capazes de degradar lignina e outros componentes estruturais da madeira (Andrade et al., 2012; Costa et al., 2017). Entretanto, a maior parte dessas abordagens baseia-se na inoculação direta de fungos, existindo poucos estudos voltados ao desenvolvimento de formulações bioestimulantes capazes de potencializar simultaneamente a microbiota nativa e promover a liberação controlada de compostos bioativos.

Nesse contexto, a bioestimulação apresenta-se como uma estratégia promissora por favorecer a atividade de microrganismos naturalmente presentes no solo e na madeira, potencializando a degradação da biomassa lignocelulósica sem comprometer a qualidade ambiental. Assim, o presente projeto tem como objetivo desenvolver e avaliar um coquetel bioestimulante de liberação controlada para acelerar a biodegradação de tocos de eucalipto por meio da bioestimulação da microbiota nativa e da potencialização da atividade ligninolítica.

Material e Métodos

A pesquisa possui caráter experimental e quantitativa, sendo conduzida nos laboratórios do Curso Técnico em Química da Fundação Liberato, com tocos de eucalipto fornecidos pela instituição.



Os isolados de *Pycnoporus sanguineus* e *Ganoderma australe*, este selecionado por sua disponibilidade na instituição e equivalência funcional a *G. applanatum* (utilizado por Andrade et al., 2012), serão reativados em BDA (7 dias, 28 ± 2 °C) e adaptados por 7 dias em meio com tampão McIlvaine (pH 5,0), licor negro lignínico, extratos de eucalipto e malte e ágar, induzindo a expressão de lacases e peroxidases.

Conforme metodologia adaptada de Toneti (2023), discos do micélio adaptado passarão por triagem em meio líquido para seleção do fungo e da formulação mais eficientes. O cultivo em tampão McIlvaine (pH 5,0) comparará o licor de lignina isolado a uma formulação bioestimulante completa (extrato de malte, extrato aquoso de eucalipto, sais minerais, vanilina e Tween 80), sob agitação (150 rpm, 10 dias e ausência de luz). A cada 2 dias, alíquotas centrifugadas serão analisadas por espectrofotometria UV-Vis para quantificar a degradação da lignina pela redução da absorbância em 280 nm ($L_{280\%}$) e a atividade de lacase por oxidação do ABTS (420 nm, conforme Buswell et al., 1995), em triplicata com branco.

Definida a melhor condição, um xerogel de sílica mesoporosa será sintetizado via sol-gel (adaptado de Maseko et al., 2023), por hidrólise alcalina da sílica comercial e gelificação com ácido cítrico. Após teste de capacidade de adsorção, a sílica será impregnada sob agitação orbital com a formulação selecionada, validando-se a liberação gradual por ensaio com NaCl em condutivímetro.

O ensaio laboratorial seguirá Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), com 5 tratamentos e 3 repetições por espécie fúngica (controle absoluto, controle fúngico, veículo inerte, efeito parcial e efeito completo), montados com serragem de eucalipto, sílica impregnada e disco de micélio (28 ± 2 °C, 70–80% de umidade relativa, 84 dias). As avaliações aos 21, 42, 63 e 84 dias incluirão crescimento micelial, perda de massa (ASTM D2017) e atividade de lacase (ABTS, 420 nm). O ensaio de campo, com o fungo e formulação de melhor desempenho, seguirá DIC em esquema fatorial com 6 tratamentos e 3 repetições (18 tocos), combinando a inserção de invólucros com sílica impregnada com a formulação bioestimulante (5 furos por toco, broca de 25 mm) e câmara de umidade, avaliando-se a resistência mecânica por penetrômetro nos dias 0, 30 e 60.

Os dados serão submetidos à Análise de Variância (ANOVA) e ao Teste de Tukey ($\alpha = 5\%$), além de regressão temporal (modelos linear, quadrático e Gompertz para o ensaio de campo), utilizando o software R ou BioEstat 5.3.

Resultados e Discussão

Os resultados serão organizados e apresentados separadamente para cada etapa do estudo (seleção do fungo/formulação, ensaio laboratorial e ensaio de campo), privilegiando a forma gráfica e tabular para facilitar a comparação entre tratamentos.



Os resultados da triagem em meio líquido serão apresentados em gráficos de degradação de lignina (L280%, absorbância em 280 nm) e de atividade de lacase (ABTS, 420 nm) ao longo dos 10 dias de ensaio, comparando cada espécie fúngica exposta ao licor de lignina isolado e à formulação bioestimulante completa. A combinação fungo/formulação com maior degradação e/ou atividade enzimática, avaliada por ANOVA e Teste de Tukey, será selecionada para a impregnação da sílica e para os ensaios subsequentes.

Para o ensaio laboratorial, as curvas de perda de massa (%) ao longo do tempo (21, 42, 63 e 84 dias) serão apresentadas em gráficos por espécie fúngica e tratamento, acompanhadas dos resultados da ANOVA e do Teste de Tukey, permitindo identificar se os tratamentos com bioestimulante (Efeito Parcial e Efeito Completo) promovem degradação estatisticamente superior ao Controle Fúngico e ao Veículo Inerte. Os dados de atividade de lacase ($\text{U} \cdot \text{mL}^{-1}$) serão apresentados em gráficos de barras ou linhas ao longo do tempo, enquanto as observações qualitativas (alteração de coloração, halos oxidativos, intensidade da pigmentação) serão sistematizadas em tabela descritiva. O crescimento micelial radial será apresentado em gráfico de dispersão em função do tempo, relacionando-se visualmente à taxa de colonização do substrato.

O perfil de liberação do traçador (NaCl) será apresentado em gráfico de porcentagem cumulativa liberada em função do tempo (0 a 168 h), permitindo discutir se a cinética observada é compatível com uma liberação gradual e sustentada, adequada à validação da sílica como veículo de disponibilização lenta dos compostos bioestimulantes, conforme proposto por Wahyu et al. (2019) e Gascón et al. (2014). Ao final do período laboratorial, o grau de friabilidade dos substratos será apresentado em tabela descritiva por tratamento.

A discussão confrontará os resultados obtidos com os dados de Andrade et al. (2012), que documentaram reduções de resistência à penetração de 49,2% ao tratamento com *P. sanguineus* e 48,9% ao tratamento com *G. applanatum*, e com Costa et al. (2017), que validaram esse potencial em ensaio de campo de 84 dias, buscando avaliar se a adição dos bioestimulantes propostos amplia a eficiência de degradação relatada na literatura para esses isolados.

Para o ensaio de campo, os dados de resistência mecânica à penetração, transformados via raiz quadrada ($\sqrt{x}$), serão apresentados em gráficos comparando a evolução dos tratamentos aos 0, 30 e 60 dias. As análises serão suportadas por ANOVA fatorial (cápsula $\times$ câmara de umidade), teste de Tukey e pelo ajuste dos modelos de regressão (linear, quadrático e de Gompertz) às curvas de decomposição. A discussão será pautada pela lógica do delineamento experimental: a superioridade estatística dos tratamentos compostos apenas pela cápsula bioestimulante (T3 e T4) em relação aos grupos controle (T1 e T2) confirmará que o estímulo químico é suficiente para reativar e acelerar a degradação pela microbiota nativa. Por outro lado, caso a associação entre a cápsula e o fungo selecionado (T5 e T6) supere o uso



exclusivo da cápsula (T3 e T4), ficará evidente a necessidade da inoculação fúngica como estratégia complementar para máxima eficiência.

Conclusões

O resultado satisfatório consistirá em demonstrar que os bioestimulantes impregnados na matriz de sílica são capazes de reativar a microbiota fúngica autóctone dos tocos de eucalipto, acelerando a decomposição sem a necessidade de inoculação de fungos externos. Assim, espera-se que o tratamento composto apenas pela matriz bioestimulante apresente desempenho significativamente superior ao tratamento controle em campo, evidenciando que o estímulo químico é suficiente para reativar os fungos locais. Caso essa hipótese não se confirme e o tratamento com adição de fungos supere o uso exclusivo do bioestimulante, restará demonstrada a necessidade da inoculação fúngica como estratégia complementar.

Do ponto de vista econômico e ambiental, os insumos utilizados na formulação da cápsula e da matriz de sílica (NaOH, ácido cítrico, sais minerais, extrato de malte e sílica comercial) apresentam baixo custo e ampla disponibilidade comercial. Consequentemente, o uso do bioacelerador consolida-se como uma alternativa financeiramente mais viável em relação à destoca mecânica, a qual demanda maquinário pesado, combustível e mão de obra especializada, e à destoca química, dependente de herbicidas de alto custo. Ademais, por dispensar o uso de equipamentos pesados e compostos agressivos, o método mitiga impactos ambientais significativos, como a compactação do solo, a erosão e a degradação ambiental (Foelkel, 2014), configurando-se como uma estratégia sustentável e de elevado custo-benefício para o manejo florestal.

Agradecimentos

Agradecemos às nossas famílias pelo suporte financeiro e apoio constante ao longo do desenvolvimento deste estudo.

Referências

- FOELKEL, C. O Problema dos Tocos Residuais das Florestas. **Eucalyptus Newsletter**, (45), 1-17, 2014.
- ANDRADE, F. A. et al. Selection of fungi for accelerated decay in stumps of Eucalyptus spp. **Bioresource Technology**, 110, 456-461, 2012.
- COSTA, L. G. et al. Potential of selected fungi for biological stump removal of Eucalyptus spp. **Forest Ecology and Management**, 402, 265-271, 2017.
- TONETI, M. H. Triagem de fungos filamentosos para degradação de lignina: avaliação da atividade ligninolítica e da enzima lacase. **Dissertação (Mestrado em Microbiologia)** – Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", São José do Rio Preto, 2023.
- BUSWELL, J. A.; CAI, Y.; CHANG, S.-T. Effect of nutrient nitrogen and manganese on manganese peroxidase and laccase production by Lentinula (Lentinus) edodes. **FEMS Microbiology Letters**, 128(1), 81-87, 1995.
- MASEKO, N. N.; ENKE, D.; IWARERE, S. A.; OLUWAFEMI, O. S.; POCKOCK, J. Synthesis of Low Density and High Purity Silica Xerogels from South African Sugarcane Leaves without the Usage of a Surfactant. **Sustainability**, 15(5), 1-12, 2023.



WAHYU, I. D.; NUNUN, B.; HADI, S. S.; LAURA, T. Silica extraction from rice husk as a slow release fertilizer using microwave assisted extraction. **RJOAS**, 12(96), 193-199, 2019.

GASCÓN, V.; DÍAZ, I.; MÁRQUEZ-ÁLVAREZ, C.; BLANCO, R. M. Mesoporous Silicas with Tunable Morphology for the Immobilization of Laccase. **Molecules**, 19(6), 7057-7071, 2014.