



BIOTRANSFORMAÇÃO FÚNGICA DE MONOTERPENOS: REVISÃO SISTEMATIZADA DAS EVIDÊNCIAS, CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS E POTENCIAL TECNOLÓGICO

Tânia T. M. Mendoza¹; Viviane S. Lobo²; Mauricio F. Rosa³; Ana C. Alves⁴

¹ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-graduação em Tecnologias em Biociências (PPGBIO) - Campus Toledo

² Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-graduação em Tecnologias em Biociências (PPGBIO) - Campus Toledo

³ Universidade Estadual do Oeste do Paraná, campus Toledo

⁴ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Mestrado em Processos Químicos e Biotecnológicos - Campus Toledo
tania.2018@alunos.utfpr.edu.br

Palavras-Chave: Biocatálise; Terpenoides; Escalonamento.

Introdução:

Os produtos naturais constituem importante fonte de moléculas de interesse científico, tecnológico e industrial, devido à diversidade estrutural e às propriedades biológicas. Entre essas substâncias, os terpenos representam uma das maiores classes de metabólitos bioativos. A subclasse monoterpênicos, um dos principais subgrupos, são formados por dez átomos de carbono e são componentes frequentes de óleos essenciais com aplicações em diferentes áreas, farmacêuticas, alimentícias, cosméticas e biotecnológicas (BAKKALI et al., 2008; DHIFI et al., 2016).

Apesar desse potencial, monoterpênicos podem apresentar elevada volatilidade, hidrofobicidade e sensibilidade às condições ambientais, características que podem limitar sua aplicação. A modificação controlada e seletiva de suas estruturas pode gerar derivados com propriedades físico-químicas e biológicas diferenciadas. Nesse contexto, a biotransformação emprega células, microrganismos ou enzimas para promover modificações químicas em substratos, podendo gerar derivados difíceis ou dispendiosos de obter por síntese convencional (GRABARCZYK et al., 2020).

Do ponto de vista químico, a biotransformação de monoterpênicos pode envolver diferentes modificações estruturais, entre as quais se destacam hidroxilação, oxidação, epoxidação e posterior hidrólise. Essas transformações podem ser representadas, de forma simplificada, pela conversão de uma ligação C-H em álcool ($R-H + [O] \rightarrow R-OH$) e pela sequência de epoxidação e hidrólise de uma ligação dupla ($R-CH=CH-R' + [O] \rightarrow$ epóxido $\rightarrow$ diol). Em monoterpênicos, essas rotas são exemplificadas pela hidroxilação do limoneno e pela formação de limoneno-1,2-epóxido seguida de sua hidrólise a limoneno-1,2-diol, transformações descritas em sistemas microbianos (MARMULLA; HARDER, 2014; MOLINA et al., 2015).

Os fungos apresentam particular interesse, como biocatalisadores, por possuírem sistemas enzimáticos diversificados capazes de promover oxidação, hidroxilação, redução, epoxidação e hidrólise, frequentemente com elevada regio- e estereosseletividade. Entretanto,



a eficiência desses processos depende da interação entre espécie e linhagem, estado fisiológico da biomassa, concentração do substrato, meio, pH, temperatura, agitação, tempo, solvente e relação biomassa/substrato.

A literatura sobre biotransformação fúngica de monoterpenos permanece fragmentada entre química de produtos naturais, microbiologia, biocatálise e engenharia de bioprocessos. Essa heterogeneidade dificulta a comparação dos estudos e a identificação de sistemas com real potencial tecnológico. Uma revisão sistematizada permite organizar essas evidências, identificar padrões de biocatalisadores e produtos, reconhecer lacunas metodológicas e verificar quais processos avançaram para escalas superiores.

A análise de uma revisão sistematizada da literatura sobre a biotransformação fúngica de monoterpenos e monoterpenoides busca contribuir para a identificação de sistemas fúngicos e rotas de biotransformação com maior potencial para a obtenção de derivados terpênicos de interesse químico, biológico e tecnológico. Assim, esse trabalho visou identificar e analisar os principais biocatalisadores empregados, os substratos utilizados, os produtos formados, os tipos de transformação química, as condições experimentais, a eficiência dos processos, o escalonamento e o potencial biotecnológico dessas transformações.

Material e métodos

Diante desse contexto, estabelece-se como pergunta-problema: quais evidências científicas publicadas entre 2015 e 2026 descrevem a biotransformação fúngica de monoterpenos e monoterpenoides de origem natural, incluindo aqueles presentes em plantas e óleos essenciais, considerando os biocatalisadores empregados, os substratos utilizados, os produtos formados, os tipos de transformação e as condições experimentais dos processos?

Foi realizada revisão da literatura de caráter sistematizado, orientada pelas recomendações PRISMA 2020 (PAGE et al., 2021). A busca foi realizada pela autora nas bases Scopus e Web of Science (WoS). A organização da matriz, síntese textual e conferência de consistência receberam apoio de inteligência artificial generativa (ChatGPT), sem substituição da leitura, avaliação e decisão final da autora.

A estratégia foi construída com três blocos: (i) biotransformação/bioconversão; (ii) fungos, fungos filamentosos, leveduras e componentes de origem fúngica; e (iii) monoterpenos/monoterpenoides. Foram empregados AND e OR, aspas e variações terminológicas. A lógica geral foi: ("*biotransformation*" OR "*bioconversion*") AND (*fung* OR "*funga*" OR "*filamentous fungus*" OR *yeast*) AND (*monoterpene** OR *monoterpenoid** OR *limonene* OR "*alpha-pinene*" OR "*beta-pinene*" OR *geraniol* OR *carvone* OR *camphor* OR *verbenone*).

Os critérios de inclusão exigiram evidência de biocatalisador fúngico ou componente de origem fúngica, monoterpeno/monoterpenoide ou matriz contendo esses compostos e ocorrência de biotransformação, bioconversão ou modificação biológica, com identificação ou caracterização dos produtos. A seleção foi realizada em função da aderência à pergunta norteadora apresentada na Introdução, priorizando estudos experimentais nos quais fosse possível relacionar biocatalisador, substrato, transformação, produto e condições do processo.

Foi elaborada matriz padronizada contendo biocatalisador, espécie/cepa, substrato, origem, concentração, meio, biomassa/inóculo, pH, temperatura, agitação, tempo, solvente/sistema, volume, escala, método analítico, produtos, transformação, conversão/rendimento, atividade biológica e potencial tecnológico. O potencial tecnológico



foi avaliado pela combinação entre conversão, seletividade, pureza, otimização, atividade biológica e escala.

Devido à heterogeneidade dos estudos, foi empregada síntese narrativa e comparativa. Os estudos foram agrupados por biocatalisador, substrato, transformação, produto, condições, eficiência, atividade biológica e potencial tecnológico. A frequência dos parâmetros foi calculada somente quando a informação estava identificada na matriz.

Resultados e discussão

Na seleção e caracterização dos estudos, a busca inicial recuperou 146.723 registros. Refinamentos sucessivos resultaram em 5.307 registros e, na estratégia final, 2.359 registros: 2.267 na WoS e 92 na Scopus.

Após triagem por título e resumo, foram selecionados 18 estudos para leitura integral por maior aderência à pergunta norteadora. Destes, 13 atenderam aos critérios e foram incluídos na síntese principal; três foram utilizados como estudos complementares para interpretação mecanística/enzimática e dois foram excluídos por não apresentarem evidência experimental diretamente aplicável ao foco da revisão. A passagem de 18 para 13 decorreu da aplicação dos critérios ao texto completo, e não de classificação por “prioridade”.

Os 13 estudos da síntese principal foram publicados entre 2015 e 2025 e envolveram fungos dos gêneros *Aspergillus*, *Trichoderma*, *Polyporus*, *Ceriporia*, *Stereum*, *Chrysosporium*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Lasioidiplodia*, *Talaromyces* e *Mucor*. Os principais substratos foram limoneno e α -pineno, além de geraniol, verbenona, carvona e cânfora. Um estudo utilizou diretamente óleo essencial de *Zanthoxylum limonella*, permitindo avaliar a transformação de uma matriz natural complexa.

Quanto aos biocatalisadores, substratos e produtos, a diversidade dos biocatalisadores foi acompanhada por diferentes perfis de produtos (Tabela 1). Limoneno e α -pineno foram os substratos mais recorrentes. As transformações predominantes foram oxidação e hidroxilação, com formação de α -terpineol, carveóis, verbenol, verbenona, limoneno-1,2-diol, 10-hidroxiverbenona e ácido gerânico.

Tabela 1 – Caracterização dos estudos incluídos na síntese principal.

Estudo	Biocatalisador	Substrato	Forma de apresentação	Produto(s) principal(is)	Transformação	Resultado principal
Bhat et al. (2024)	<i>A. flavus</i> IIMF4012	D-limoneno	NR	cis-/trans-carveol	Hidroxilação	23,82% cis; 17,21% trans
Ben Bnina et al. (2020)	<i>T. harzianum</i> / <i>S. cerevisiae</i>	(R)-limoneno	NR	Monoterpenos oxigenados	Bioconversões sucessivas	Conversão completa relatada
Lee et al. (2015a)	<i>P. brumalis</i>	(-)- α -pineno; geraniol	NR	α -terpineol; PMD	Oxidação/transformação	Produtos principais identificados
Khruên gsai et al. (2024)	<i>P. pseudoellipsoidum</i> ; <i>S. pini</i> ; <i>T. jaczewskii</i>	OE de <i>Z. limonella</i>	Óleo essencial (direto)	Cryptone; neoiso-verbanol; cis-limonene oxide; outros	Transformação de componentes do OE	Perfil volátil modificado; atividade antibacteriana aumentada



Estudo	Biocatalisador	Substrato	Forma de apresentação	Produto(s) principal(is)	Transformação	Resultado principal
Lee et al. (2015b)	<i>Ceriporia sp.</i> ZLY-2010; <i>S. hirsutum</i>	(-)- α -pineno	NR	α -terpineol; verbenona; outros	Oxidação	0,05 g L ⁻¹ α -terpineol; verbenona principal
Gazioglu et al. (2023)	<i>A. flavus</i>	Carvona; cânfora	NR	Derivados oxigenados	Múltiplas transformações	Até 74% de inibição de aflatoxina B1
Trytek et al. (2016)	<i>C. pannorum</i>	α -pineno	NR	Verbenona; verbenol	Oxidação	Atividade total >2× com pré-estresse
Molina et al. (2015)	<i>F. oxysporum</i> 152B	R-(+)/S-(-)-limoneno	NR	α -terpineol; limoneno-1,2-diol	Estereoespecífica	Produtos distintos conforme enantiômero
Tai et al. (2016)	<i>P. digitatum</i> DSM 62840	(R)-(+)-limoneno	NR	α -terpineol	Hidroxilação/regioseletividade	833,93 mg L ⁻¹
Trytek et al. (2015)	<i>C. pannorum</i> A-1	α -pineno	NR	Verbenol; verbenona	Oxidação por O ₂	Até 722 mg L ⁻¹ verbenol
Ayoub et al. (2025)	<i>L. pseudotheobromae</i> IIMF4013	Limoneno	NR	Limoneno-1,2-diol	Di-hidroxilação	Quase conversão completa; >99% pureza
Manhas et al. (2024)	<i>T. purpurogenus</i> MRS-F13	(-)-verbenona	NR	(-)-10-hidroxiverbenona	Hidroxilação	~70% conversão
Shafeeq et al. (2024)	<i>M. irregularis</i> IIMF4011	Geraniol	NR	Ácido gerânico	Oxidação	97–100%; 98,89% no fermentador

Lee et al. (2015a) utilizaram *Polyporus brumalis* para transformar (-)- α -pineno em α -terpineol e geraniol em p-mentano-3,8-diol (PMD). Com *Ceriporia sp.* ZLY-2010 e *Stereum hirsutum*, (-)- α -pineno foi transformado, com formação de α -terpineol por *Ceriporia* e predominância de verbenona por *Stereum*. A matriz atual não identifica se os substratos foram empregados puros, em solução ou diretamente em óleo essencial; por isso, essa informação não foi inferida.

Khruëngsai et al. (2024) utilizaram óleo essencial de *Zanthoxylum limonella* como matriz de transformação. *Pleopunctum pseudoellipsoideum*, *Stagonosporopsis pini* e *Thyrostroma jaczewskii* modificaram sua composição volátil, com diferentes produtos entre os fungos, incluindo óxido de limoneno, hidrato de pineno, criptone e neoiso-verbanol. O estudo demonstra que uma matriz complexa pode gerar perfis químicos distintos entre biocatalisadores.

As biotransformações predominantes envolveram funcionalização oxidativa de estruturas terpênicas. A hidroxilação pode ser representada por $R-H + [O] \rightarrow R-OH$. Para limoneno, também foi observada a rota alceno $\rightarrow$ epóxido $\rightarrow$ diol, enquanto geraniol foi oxidado até ácido gerânico. Essas modificações introduzem grupos funcionais que podem alterar propriedades físico-químicas e biológicas.

Fusarium oxysporum 152B converteu R-(+)-limoneno em α -terpineol e S-(-)-limoneno em limoneno-1,2-diol. Molina et al. (2015) caracterizaram a formação do limoneno-1,2-diol como processo aeróbio, intracelular, dependente de cofator e catalisado por limoneno-1,2-epóxido hidrolase, indicando a sequência limoneno $\rightarrow$ epóxido $\rightarrow$ diol. *Penicillium digitatum* DSM 62840 converteu (R)-(+)-limoneno em α -terpineol com elevada regioseletividade.

A avaliação das condições reacionais pode contribuir para entender a diferenciação dos produtos obtidos após cada biotransformação.

Quanto às condições experimentais e eficiência, a comparação dos parâmetros experimentais revelou heterogeneidade importante (Tabela 2). Tempo, concentração, pH, temperatura, agitação e solvente não foram relatados uniformemente, reduzindo a possibilidade de comparar rendimentos e reproduzir os processos.

Tabela 2 – Condições experimentais e eficiência dos processos.

Estudo	Substrato/ forma de apresenta- ção	Con- centra- ção	pH	T (°C)	Tempo	Agita- ção	Solvente/ sistema	Escala	Resultado
Bhat et al. (2024)	D- limoneno/ NR	—	—	—	—	—	—	1 $\rightarrow$ 5 L	23,82% cis- carveol + 17,21% trans- carveol
Ben Bnina et al. (2020)	(R)- limoneno/ NR	—	—	—	—	—	O ₂ do ar	—	Conversão completa relatada
Lee et al. (2015a)	(-)- α - pineno; geraniol/ NR	—	—	—	3 dias (α - pineno)	—	—	—	α -terpineol e PMD identificados
Khruëngsai et al. (2024)	OE de Z. limonella/ óleo essencial (direto)	—	—	—	—	—	—	—	Perfis voláteis distintos; atividade antibacteriana aumentada
Lee et al. (2015b)	(-)- α - pineno/ NR	—	—	—	96 h	—	—	—	Ceriporia: 0,05 g L ⁻¹ α - terpineol; Stereum: verbenona principal
Gazioglu et al. (2023)	Carvona; cânfora/ NR	—	—	—	—	—	—	—	Até 74% de inibição de aflatoxina B1
Trytek et al. (2016)	α -pineno/ NR	1% (v/v)	2 ou 10*	20*	24 h*	—	1,4- dioxano	—	>2 $\times$ atividade; maior verbenol



Estudo	Substrato/ forma de apresenta- ção	Con- centra- ção	pH	T (°C)	Tempo	Agita- ção	Solvente/ sistema	Escala	Resultado
Molina et al. (2015)	R-(+)/S-(-) limoneno /NR	—	—	—	—	—	—	—	R- limoneno→ α - terpineol; S- limoneno→lim- oneno-1,2-diol
Tai et al. (2016)	(R)-(+)- limoneno/ NR	840 mg L ⁻¹	6,0	24	12 h	150 rpm	Etanol	—	833,93 mg L ⁻¹ α -terpineol
Trytek et al. (2015)	α -pineno/ NR	1– 1,5% (v/v)	—	—	1–3 dias	—	—	—	Até 722 mg L ⁻¹ verbenol
Ayoub et al. (2025)	Limoneno /NR	—	—	—	—	—	—	Até 30 L	Quase conversão completa; >99% pureza
Manhas et al. (2024)	(-)- verbenona /NR	—	—	—	96 h	—	—	15 L	~70% conversão
Shafeeq et al. (2024)	Geraniol/ NR	20 mmol L ⁻¹	7,0	28	72 h	200 rpm	—	3 L; 1,5 L traba- lho	97–100%; 98,89% no fermentador

Nota: “—” = informação não identificada na matriz; NR = não relatado na matriz atual. * condições de pré-estresse, quando aplicáveis, não correspondem necessariamente às condições finais de biotransformação.

O tempo de biotransformação foi informado em 7/13 estudos (53,8%), volume/escala em 4/13 (30,8%), concentração em 4/13 (30,8%), temperatura em 3/13 (23,1%), pH em 3/13 (23,1%), agitação em 2/13 (15,4%) e solvente/sistema em 2/13 (15,4%). A baixa frequência de relato evidencia uma lacuna metodológica, pois a ausência de condições experimentais impede a reprodução e a comparação direta entre estudos. Assim, diferenças de conversão, rendimento ou perfil de produtos não podem ser atribuídas com segurança ao biocatalisador ou ao substrato sem considerar as condições empregadas.

Tai et al. (2016) obtiveram 833,93 mg L⁻¹ de α -terpineol a partir de 840 mg L⁻¹ de (R)-(+)-limoneno, utilizando pH 6,0, 24 °C, 150 rpm, 12 h e etanol. Em Trytek et al. (2015, 2016), estado fisiológico, pré-estresse e alimentação sequencial do α -pineno alteraram a formação de verbenol e verbenona. Shafeeq et al. (2024) obtiveram 97–100% de conversão de geraniol em ácido gerânico a 28 °C, pH 7,0 e 20 mmol L⁻¹, em 72 h; no fermentador de 3 L, com 1,5 L de volume de trabalho, a conversão alcançou 98,89%. Esses dados mostram que a eficiência depende da interação entre fungo, substrato e condições do processo.

Quanto ao escalonamento, atividade biológica e potencial tecnológico, quatro estudos apresentaram evidências de escalonamento. Bhat et al. (2024) avaliaram D-limoneno em 1 e 5 L, com formação de 23,82% de cis-carveol e 17,21% de trans-carveol. Ayoub et al. (2025) realizaram a conversão de limoneno em limoneno-1,2-diol até 30 L, com quase conversão completa e pureza superior a 99%. Manhas et al. (2024) transformaram (-)-verbenona em (-)-



10-hidroxiverbenona em 15 L, com aproximadamente 70% de conversão. Shafeeq et al. (2024) alcançaram 98,89% de conversão de geraniol em ácido gerânico em fermentador de 3 L, com 1,5 L de volume de trabalho.

Além do escalonamento, alguns estudos avaliaram efeitos biológicos. Khruëngsai et al. (2024) observaram alteração da composição do óleo essencial de *Zanthoxylum limonella* e aumento da atividade antibacteriana frente a *Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus epidermidis*, *Escherichia coli* e *Pseudomonas aeruginosa*. Gazioglu et al. (2023) relataram até 74% de inibição de aflatoxina B1. Manhas et al. (2024) relataram melhora da atividade antioxidante e atividade anti-inflamatória após a conversão de (-)-verbenona em (-)-10-hidroxiverbenona.

O potencial tecnológico deve ser interpretado a partir da combinação entre transformação, eficiência e ampliação de escala. Ayoub et al. (2025) destacam-se pela conversão de limoneno em limoneno-1,2-diol em até 30 L, com quase conversão completa e pureza superior a 99%. Shafeeq et al. (2024) demonstraram a transformação de geraniol em ácido gerânico em fermentador de 3 L, com 98,89% de conversão. Entretanto, o escalonamento não equivale, por si só, à aplicação industrial consolidada.

Conclusões

A revisão sistematizada demonstrou que a biotransformação fúngica constitui estratégia promissora para a diversificação estrutural de monoterpenos e monoterpenoides. A análise dos 13 estudos da síntese principal mostrou predominância de reações oxidativas e hidroxilações, com formação de derivados como α -terpineol, carveóis, verbenol, verbenona, limoneno-1,2-diol, 10-hidroxiverbenona e ácido gerânico.

Os resultados confirmam que o biocatalisador, a estrutura do substrato e as condições de processo influenciam a seletividade e a eficiência. A formação de produtos distintos a partir de enantiômeros do limoneno e a obtenção de diferentes produtos a partir de α -pineno demonstram a relevância da especificidade fúngica. Alguns processos também apresentaram elevada conversão, pureza, atividade biológica e escalonamento em litros.

Conclui-se que o potencial tecnológico da área depende da integração entre seleção racional do fungo, otimização das condições, caracterização química, avaliação biológica e escalonamento. A principal lacuna identificada foi a heterogeneidade no relato de parâmetros experimentais, o que limita a reprodução e a comparação dos processos. Dessa forma, estudos futuros devem priorizar descrição experimental padronizada e integração entre transformação química, eficiência, propriedades do produto e viabilidade tecnológica.

Agradecimentos

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Campus Toledo), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), BIOPARK - Parque Científico e Tecnológico de Biociências (Toledo/PR).

Referências

- AYOUB, N. et al. Biotransformation of limonene to limonene-1,2-diol using an isolated fungus *Lasiodiplodia pseudotheobromae* IIMF4013. **Biocatalysis and Biotransformation**, v. 43, p. 245–253, 2025. DOI: 10.1080/10242422.2025.2462730.
- BAKKALI, F. et al. Biological effects of essential oils – A review. **Food and Chemical Toxicology**, v. 46, n. 2, p. 446–475, 2008. DOI: 10.1016/j.fct.2007.09.106.



- BEN BNINA, E. et al. Access to oxygenated monoterpenes via the biotransformation of (R)-limonene by *Trichoderma harzianum* and *Saccharomyces cerevisiae*. **Chemistry Africa**, 2020. DOI: 10.1007/s42250-020-00154-3.
- BHAT, N. A. et al. Biotransformation of D-limonene to carveol by an endophytic fungus *Aspergillus flavus* IIMF4012. **Biocatalysis and Biotransformation**, v. 42, n. 2, 2024. DOI: 10.1080/10242422.2023.2178309.
- DHIFI, W. et al. Essential oils' chemical characterization and investigation of some biological activities: a critical review. **Medicines**, v. 3, n. 4, p. 25, 2016. DOI: 10.3390/medicines3040025.
- GAZIOGLU, I. et al. Fungal biotransformation of carvone and camphor by *Aspergillus flavus* and investigation of cytotoxic activities of naturally obtained essential oils. **Natural Product Research**, v. 37, p. 944–955, 2023. DOI: 10.1080/14786419.2022.2098957.
- GRABARCZYK, M. et al. Transformations of monoterpenes with the p-menthane skeleton in the enzymatic system of bacteria, fungi and insects. **Molecules**, v. 25, n. 20, 4840, 2020. DOI: 10.3390/molecules25204840.
- KHRUËNGSAI, S. et al. Biotransformation of essential oil composition of *Zanthoxylum limonella* by the fungus *Pleopunctum pseudoellipsoideum* provides the products with enhanced antimicrobial activities. **Process Biochemistry**, v. 136, p. 221–228, 2024. DOI: 10.1016/j.procbio.2023.11.030.
- LEE, S.-Y. et al. Biotransformation of (-)- α -pinene and geraniol to α -terpineol and p-menthane-3,8-diol by the white rot fungus, *Polyporus brumalis*. **Journal of Microbiology**, v. 53, p. 462–467, 2015a. DOI: 10.1007/s12275-015-5081-9.
- LEE, S.-Y. et al. Biotransformation of (-)- α -pinene by whole cells of white rot fungi, *Ceriporia* sp. ZLY-2010 and *Stereum hirsutum*. **Mycobiology**, v. 43, p. 297–302, 2015b. DOI: 10.5941/MYCO.2015b.43.3.297.
- MANHAS, R. S. et al. *Talaromyces purpurogenus* MRS-F13 catalyzed biotransformation of (-)-verbenone to (-)-10-hydroxyverbenone and their anti-inflammatory activity profile. **Biocatalysis and Biotransformation**, v. 42, n. 2, p. 118–128, 2024. DOI: 10.1080/10242422.2022.2138359.
- MARMULLA, R.; HARDER, J. Microbial monoterpene transformations—a review. **Frontiers in Microbiology**, v. 5, art. 346, 2014. DOI: 10.3389/fmicb.2014.00346.
- MOLINA, G. et al. Comparative study of the bioconversion process using R-(+)- and S-(-)-limonene as substrates for *Fusarium oxysporum* 152B. **Food Chemistry**, v. 174, p. 606–613, 2015. DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.11.059.
- PAGE, M. J. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, v. 372, n. 71, 2021. DOI: 10.1136/bmj.n71.
- SHAFEEQ, H. et al. Biotransformation of geraniol to geranic acid using fungus *Mucor irregularis* IIMF4011. **ACS Omega**, v. 9, n. 40, p. 41314–41320, 2024. DOI: 10.1021/acsomega.4c03538.
- TAI, Y.-N. et al. Optimisation of α -terpineol production by limonene biotransformation using *Penicillium digitatum* DSM 62840. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 96, p. 954–961, 2016. DOI: 10.1002/jsfa.7171.
- TRYTEK, M.; FIEDUREK, J.; GROMADA, A. Effect of some abiotic stresses on the biotransformation of α -pinene by a psychrotrophic *Chrysosporium pannorum*. **Biochemical Engineering Journal**, 2016. DOI: 10.1016/j.bej.2016.03.010.
- TRYTEK, M.; JĘDRZEJEWSKI, K.; FIEDUREK, J. Bioconversion of α -pinene by a novel cold-adapted fungus *Chrysosporium pannorum*. **Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology**, v. 42, p. 181–188, 2015. DOI: 10.1007/s10295-014-1550-0.