

Potencial de aplicação bioindustrial da microbiota intestinal de cupins

Potential bioindustrial application of termite gut microbiota

João Pedro Campelo Ribeiro¹, Edgar Pereira David Santos² e Eidy de Oliveira Santos³

1. Graduação em Ciências Biológicas, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Campus Zona Oeste (UERJ-ZO) – Brasil; 2. Programa de Pós-Graduação em Biomedicina Translacional (BIOTRANS), Unigranrio, UERJ-ZO) – Brasil; 3. Laboratório de Tecnologia em Bioquímica e Microbiologia (LTBM), UERJ-ZO – Brasil.

Ribeiro, J. P. C.
<https://orcid.org/0009-0009-7675-5761>
jpcrrj@gmail.com

Santos, E. P. D.
<https://orcid.org/0000-0002-4367-3016>
edgar_pds@hotmail.com

Santos, E de O.*
<https://orcid.org/0000-0002-4385-6066>
eidyos@gmail.com

* Autor correspondente: Rua Manuel Caldeira de Alvarenga, 1203 – Campo Grande, Rio de Janeiro – RJ – CEP 23070-200.

Resumo: A crise climática causada pelo aquecimento global evidencia a necessidade urgente de viabilizar a descarbonização de processos produtivos em diversos setores da economia. Governos, investidores financeiros e empresas destinam cada vez mais recursos para projetos de energia renovável. Segundo a agência de dados Bloomberg New Energy Finance (2023), nos primeiros seis meses de 2023 foram investidos US\$ 358 bilhões em projetos de energia renovável em todo o mundo, um aumento de 22% em comparação ao mesmo período de 2022. Nesse cenário, a bioprospecção de rotas produtivas a partir da diversidade genética e bioquímica da microbiota intestinal de insetos como cupins pode apontar oportunidades para o desenvolvimento das chamadas tecnologias verdes. O objetivo do presente estudo é realizar uma busca livre com palavras-chaves correlatas aos temas de interesse por manuscritos acadêmicos, invenções e biomoléculas de interesse utilizando plataformas de busca como Pubmed, NCBI e Science Direct.

Palavras-chave: Bioprospecção; Biotecnologia; Isoptera; Enzimas.

Abstract: The climate crisis caused by global warming highlights the urgent need to make the decarbonization of production processes feasible in various sectors of the economy. Governments, financial investors, and companies increasingly allocate resources to renewable energy projects. According to the Bloomberg New Energy Finance data agency, in the first six months of 2023 US\$ 358 billion were invested in renewable energy projects worldwide, an increase of 22% compared to the same period in 2022. In this scenario, the bioprospecting of production routes based on the genetic and biochemical diversity of the intestinal microbiota of insects such as termites could point to opportunities to develop so-called green technologies. This study aims to carry out a free search using keywords related to the topics of interest for academic manuscripts, inventions, and biomolecules of interest using search platforms such as Pubmed, NCBI, and Science Direct.

Keywords: Bioprospecting; Biotechnology; Isoptera; Enzymes.

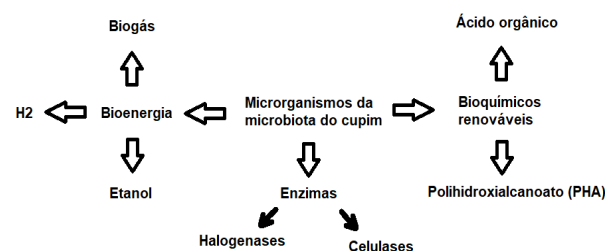
INTRODUÇÃO

Diversos países e empresas ao redor do mundo têm planejado realizar investimentos para descarbonizar suas economias e processos produtivos nas próximas décadas, porém, alcançar tais objetivos demandará vultosos recursos financeiros. Para zerar as emissões de carbono até meados do século XXI seria necessário um aporte de US\$ 2,7 trilhões por ano até 2050 (Wood Mackenzie, 2023). Na atual conjuntura, onde se demanda urgência na redução das emissões de carbono na atmosfera, mas também exige vultosos numerários financeiros para o desenvolvimento de projetos de energia renovável e rotas tecnológicas, a bioprospecção de rotas metabólicas e moléculas de interesse a partir da microbiota intestinal do cupim pode representar uma oportunidade competitiva para produção de produtos sustentáveis (como biocombustíveis e biomateriais) para auxiliar na redução da emissão de carbono dos processos produtivos. Um exemplo que pode ser citado de produto com alto potencial produtivo é o etanol (biocombustível produzido por microrganismos); as baterias de íon lítio armazenam aproximadamente 690 watts-hora (Wh) de energia e 1 litro de etanol hidratado possui aproximadamente 6.260 Wh de energia (“Mais energia”, 2019).

A microbiota do cupim pode fornecer soluções viáveis tecnologicamente e economicamente rentáveis para a produção de produtos biotecnológicos com baixa emissão de poluentes a partir da biomassa lignocelulósica, haja vista que esses insetos são importantes no ciclo do carbono e nitrogênio, e como fonte de catalisadores bioquímicos para a conversão de madeira e outras biomassas ricas em celulose, em monossacarídeos e produtos fermentados como o acetato e o metano, sendo este último especialmente importante no efeito estufa (Lee e Wood, 1971). Há comprovações de que os cupins possuem grande eficiência na digestão da celulose (77 – 99%) e hemicelulose (65 – 87%). Estas atividades são principalmente atribuídas a uma microbiota simbiótica bastante complexa e variada, que inclui bactérias, arqueias e flagelados eucarióticos (Purdy, 2007). Segundo Brune (2006), o intestino posterior dos cupins pode ser visto como um pequeno, porém altamente eficiente, biorreator natural; o qual possui alta

capacidade de metabolizar fontes complexas de carbono e energia. A microbiota intestinal dos cupins pode gerar diversas moléculas com elevado potencial energético e valor econômico, como enzimas (Watanabe H & Tokuda, 2010), açúcares menores (Ohkuama, 2003), álcoois (Scharf & Boucias, 2010), gases como hidrogênio (H₂) e Metano (CH₄) (Pester & Burne, 2007), polímeros e ácidos orgânicos a partir da digestão da biomassa vegetal (Figura 1). Dessa forma, são uma fonte substancial de estudo para o desenvolvimento de novas tecnologias relacionadas com a metabolização destes compostos.

Figura 1 – Principais produtos e matérias-primas que podem ser obtidas a partir da microbiota do cupim. Fonte: O próprio autor.



A agroindústria produz uma elevada quantidade de biomassa de diversas fontes, como o bagaço de cana e a palha do milho, que não são aproveitados adequadamente ou de forma ambientalmente correta pelo setor produtivo (Rocha et al., 2017). O Brasil aparece em posição de destaque e com uma considerável vantagem competitiva na produção de bioprodutos derivados da biomassa, haja vista que é um grande produtor de matérias-primas agrícolas e com um potencial mercado a ser explorado na geração de energia (Lopes et al., 2019).

A transição energética e a busca por constituir cadeias de produção sustentáveis podem representar uma oportunidade para o desenvolvimento de bioprocessos e para a produção de produtos renováveis. O presente estudo mostra o resultado de uma revisão a partir de artigos científicos, invenções e moléculas ligadas a essas oportunidades tecnológicas, visando informar e difundir a prospecção de processos produtivos sustentáveis a partir da microbiota intestinal de cupins utilizando a biomassa lignocelulósica como matéria prima.

METODOLOGIA

O artigo atual se trata de uma revisão narrativa em que foram realizadas buscas por assuntos, moléculas e invenções correlatas com o tema abordado. Para busca dessas bibliografias foram usados os motores de busca Pubmed, Science Direct e a plataforma de dados biológicos NCBI, com combinações como: *Termite* + “Production” + Produto de interesse- (para pesquisar artigos sobre produção de bioprodutos – Tabela 1) e - *Termite* + Microbiota + Enzima de interesse (para enzimas que são encontradas na microbiota do cupim e associadas também a produção de produtos sustentáveis – Tabela 2). As pesquisas dos artigos ocorreram entre os dias 27 de setembro de 2023 a 03 de janeiro de 2024.

Para ser possível realizar uma prospecção baseada em descobertas e estudos mais atualizados, foram analisados artigos de revisão e de pesquisa publicados entre os anos de 2000 e 2023. De todos os artigos encontrados com a metodologia citada anteriormente, o critério de inclusão para o presente estudo foi realizado com base na sua relevância e pertinência para o objetivo da revisão, de modo que os trabalhos escolhidos são aqueles que melhor contribuem para o entendimento ou análise do tema específico que está sendo investigado.

Tabela 1 – Palavras-Chaves usadas na prospecção dos artigos científicos.

Matriz de busca fixa	Variáveis
Termite + “Production” +	Halogenase
	Xylose isomerase
	Hydrogenase
	Ethanol
	Polyhydroxyalkanoate
	Acid citric
	Acid lactic
	Acid succinic

Tabela 2 – Palavras-chaves usadas na prospecção das proteínas de interesse na microbiota do cupim.

Matriz de busca fixa	Variáveis
Termite + Microbiota +	Halogenase
	Xylose isomerase
	Cellulase
	Hydrogenase
	PHA synthase
	Pseudomonas
	Acid lactic Synthase
	Malate dehydrogenase

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Quando se analisa a quantidade e data de publicação dos artigos sobre o assunto pode-se ver que foram publicados 1.820 artigos entre 2000 e 2023, (Tabela 1 - Material Suplementar), mostrando a considerável quantidade de publicações sobre o assunto nas últimas duas décadas. Na prospecção realizada no banco de dados NCBI, foi observada a presença de 809 proteínas relacionadas à produção de bioprodutos na microbiota intestinal do cupim (Tabela 2 - Material Suplementar).

Na presente revisão, será analisado o potencial biotecnológico da microbiota intestinal dos cupins apresentando artigos de pesquisa e das proteínas catalogadas nos bancos de dados biológicos. Quando se esmiúça os resultados encontrados, percebe-se que o assunto com mais artigos publicados é sobre a produção de etanol (1.365 resultados) seguido dos resultados referentes a produção de ácido láctico (300 resultados), esse dado demonstra que as pesquisas sobre biocombustíveis e ácidos orgânicos, é um tópico de relevância na academia nas últimas duas décadas. Acerca dos resultados da prospecção de proteínas, a tendência se repete, porém, com proteínas ligadas a produção de ácido láctico sendo as mais encontradas (264 resultados de “Acid Lactic synthase”, enzima ligada a síntese de ácido láctico) e, em seguida, as enzimas xilose isomerase (193 resultados), essas enzimas atuam na degradação da biomassa lignocelulósica para a posterior fermentação. A seguir, são apresentadas algumas referências de pesquisa que mostram um panorama do que se tem de conhecimento na academia e a prospecção de proteínas que reitera o que é apresentado nesses artigos (Tabela 3).

Tabela 3 – Prospecção de produtos e enzimas e suas respectivas bibliografias.

Produtos/Enzimas de interesse	Aplicações industriais	Referências
Halogenase	Química Medicinal Fabricação de agroquímicos Síntese de moléculas químicas	(Fralely & Sherman, 2019) (Hegarty et al., 2023)
Xilose isomerase	Produção de Xarope de milho Produção de Etanol	(DiCosimo et al., 2013) (Chanitnun & Pinphanichakarn, 2012)
Etanol	Combustível Produção de combustível sustentável de aviação Matéria -prima para a fabricação de Diesel e Nafta	(Mendiburu et al., 2022) (Yao et al., 2017)
Hidrogênio verde	Produção de amônia Armazenamento de energia Produção de aço	(Liu & Han, 2017) (Chauhan & Bhattacharya, 2019) (Keramidas et al., 2024)
Polihidroxialcanoato (PHA)	Embalagens Dispositivos eletrônicos Componentes automotivos	(Poltronieri & Kumar, 2017)
Ácido cítrico	Produção de medicamentos Produção de desinfetante Aditivo alimentar	(Lambros et al., 2022) (Mores et al., 2021)
Ácido Láctico	Produção de polímeros biodegradáveis Fabricação de repelentes de mosquito Fabricação de cosméticos	(Abedi & Hashemi, 2020)
Ácido succínico	Matéria-prima para a produção Polibutileno Succinato (Biopolímero semelhante ao PET) Produção de compostos ativos farmacêuticos Fabricação de perfumes	(Paul et al., 2019)

METABÓLITOS E MOLÉCULAS PRODUZIDAS A PARTIR DA MICROBIOTA DO CUPIM

Halogenase

Os compostos químicos com átomos de halogênio, chamados compostos químicos halogenados, correspondem por 96% dos herbicidas, fungicidas, inseticidas, acaricidas e nematicidas produzidos desde 2010 (JESCHKE, 2017). As halogenases são enzimas que atuam na ativação das ligações carbono-halogênios e podem ser utilizadas na síntese de agroquímicos e fármacos (Crowe et al., 2021).

Em pesquisa realizada no NCBI por proteínas halogenases identificadas em cupins, foram encontrados 48 resultados

de proteínas, das quais 41 são proteínas hipotéticas (são previstas de serem expressas em um organismo, porém, não possui nenhuma evidência de sua existência), 5 são halogenases dependentes de flavina (enzimas que atuam em substratos aromáticos), 1 triptofano halogenase (atua na biossíntese de alcaloides halogenados) e 1 oxidoreductase LodB dependente de FAD (atua em reações de oxirredução).

Os avanços nas áreas da biologia sintética e engenharia metabólica apresentam uma conjuntura paradoxal, haja vista, que ocorre a crescente comercialização de produtos de base biológica, entretanto, o espectro estrutural das moléculas que podem ser produzidos pela via da biossíntese mostra-se bastante limitado (Cross *et al.*, 2022). Entretanto, na literatura, evidências apontam micróbios com capacidade de produzir moléculas complexas de grupos funcionais

exóticos, sendo um campo ainda pouco explorado na bioquímica (Medema et al., 2021). Lennart et al. (2021), encontraram enzimas halogenase dependentes de flavina em cupins do gênero *Termitomyces* associados a fungos. Já foi descrito também, duas famílias de policetídeos halogenados produzidos por linhagens de fungos mutualísticos de cupins da Guiana Francesa e a adição de halogênio dessas moléculas é catalisada por halogenase dependente da FAD (Hebra et al., 2022).

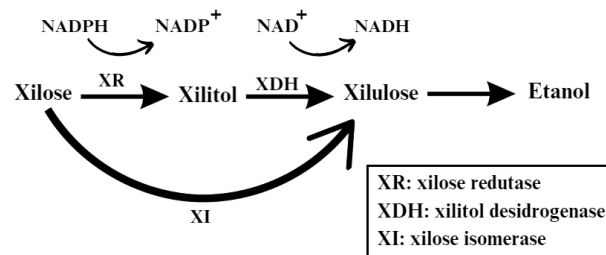
Xilose isomerase

A xilose isomerase atua na catálise da isomerização de D-xilose em D-xilulose (figura 2) com atividade em outros sacarídeos como D-glucose, D-alose e L-arabinose (Barreto et al., 2023). Essa enzima é de interesse comercial pois faz a degradação em açúcares grandes da biomassa lignocelulósica em açúcares menores que podem ser usados em processos fermentativos para a produção de biocombustíveis e produtos químicos (Bajpai, 2023).

Em pesquisa realizada no NCBI por proteínas xilose isomerase de cupins, foram encontrados 193 resultados de proteínas, das quais 22 são isoladas do metagenoma do intestino de cupins; essas proteínas foram observadas no genoma de *Streblomastix strix*, protista que auxilia outros protistas a digerirem madeira. Treitli et al. (2019) realizaram a anotação funcional dos genomas e do metagenoma e indicaram que microrganismos simbioses da microbiota dos cupins são agentes da degradação de polissacarídeos maiores e fermentadores de açúcares como acetato succínico.

Como já citado anteriormente, a xilose isomerase é de interesse da indústria pois atua na degradação de moléculas de difícil assimilação por microrganismos fermentadores produtores de bioprodutos. Um exemplo de aplicação dessa enzima no setor produtivo é a invenção da fabricante de automóveis japonesa Toyota que utiliza uma xilose isomerase oriunda da microbiota do cupim para produzir xilulose de maneira mais eficiente e pulando etapas de transformação (Figura 2) (Katahira, 2011).

Figura 2 – Xilose isomerase (XI) oriunda da microbiota do cupim envolvida na degradação de xilose, convertendo-a em xilulose. Fonte: Adaptado de Katahira, 2011.



ENERGIA RENOVÁVEL

Etanol

Novas rotas para a produção de energia renovável vem sendo cada vez mais alvo do investimento de governos, empresas e universidades de diversos países. Os biocombustíveis, principalmente etanol e biodiesel, são cada vez mais representativos na matriz energética internacional (U.S Energy Information Administration [EIA], 2019). Nesse cenário, o etanol celulósico (conhecido como etanol de segunda geração é produzido a partir da biomassa lignocelulósica) aparece como um produto capaz de atuar na substituição de combustíveis fósseis, uma vez que, apenas no Brasil, milhões de toneladas de resíduos agrícolas e agroindustriais são produzidos a cada ano, devido à alta diversidade agrícola no território (Lopes et al., 2017).

A conversão da biomassa lignocelulósica em biocombustíveis por via fermentativa é uma opção atrativa para a produção de energia renovável (Kumar et al., 2009); se tentou desenvolver estirpes de alguns microrganismos geneticamente engenheirados para fermentação de celulose como *Saccharomyces cerevisiae* e *Escherichia coli* (Joong Oh & Su jin 2020; Saini et al., 2016), porém, estirpes geneticamente modificadas não alcançaram produtividade esperada em escala industrial, devido a problemas com a expressão gênica e estabilidade genética das estirpes (Gunasekaran & Raj, 1999). Vasan et al. (2011) apresentaram um estudo sobre um gene de endoglucanase oriundo de uma cepa celulolítica de

Enterobacter, uma cepa que habita a microbiota da espécie *Heterotermes indicola*, um cupim de madeira.

A conclusão do estudo é que se conseguiu chegar a uma cepa recombinante de *Z. mobilis*, com um plasmídeo codificador de celulase de *E. cloacae*, que é capaz de utilizar como substrato a biomassa lignocelulósica pré-tratada com NaOH, para a produção de etanol em condições anaeróbias.

Em pesquisa realizada no NCBI por proteínas celulasas da microbiota do cupim foram encontrados 43 resultados. As 43 proteínas encontradas são enzimas de hidrólise de glicosídeo, enzimas que atuam na catálise das ligações glicosídicas presentes entre as duas primeiras unidades monoméricas de polissacarídeos (Gravende et al., 2023). As proteínas citadas foram identificadas em um grande conjunto de genes bacterianos que catalisam a degradação de celulose e xilose (Wernecke et al., 2007).

Hidrogênio verde

Uma das fontes de energia limpa mais promissoras no mercado é o chamado hidrogênio verde, gás hidrogênio produzido utilizando fontes renováveis. O Hidrogênio Verde conquista cada vez mais fatias do mercado de energia mundial, segundo análise da consultoria indo-canadense Precedence Research (2023), o mercado global de hidrogênio verde pode chegar a US\$ 134.38 bilhões de dólares até 2032, sendo assim alvo do investimento de empresas tanto em plantas “greenfield” como em equipamento e insumos para etapas do processo produtivo. Porém, segundo análises da Bloomberg Finance L.P. (2023), um dos fatores impeditivos para que a produção de hidrogênio verde seja viável em larga escala é a necessidade intensiva de energia renovável para a eletroforese da água.

Neste contexto, microrganismos metanogênicos são uma alternativa para a prospecção de rotas produtivas para a produção de hidrogênio verde sem a necessidade de realizar eletroforese da água e utilizando matérias primas renováveis como a celulose. Esses microrganismos são hidrogenotróficos, isto é, reduzem o gás carbônico (CO₂) e o metano (CH₄) através da via C1 utilizando hidrogênio molecular e esses são parte da microbiota intestinal dos cupins (Liu y et al., 2008). Em pesquisa realizada no NCBI

por proteínas Hidrogenase da microbiota do cupim, foram encontrados 89 resultados, sendo 87 [Fe-Fe] hidrogenase (enzima que atua na catálise da interconversão formal entre hidrogênio e os prótons\elétrons), 1 hidrogenase, 3 maturadoras de protease (Protease que participa do processamento de c-terminal) e 1 NADH dehidrogenase (ubiquinone) (flavoproteína que possui centros de ferro-sulfeto).

A literatura apresenta trabalhos que mostram a diversidade de hidrogenases em microrganismos da microbiota do cupim. Hao Zheng e colaboradores (2013), que analisou 776 filotipos de genes de hidrogenases nas espécies *Hodotermopsis sjoestedti*, *Reticulitermes speratus* e *Nasutitermes takasagoensis* mostrando haver uma grande diversidade de genes de hidrogenases na microbiota do cupim. Sequências de DNA plasmídico de hidrogenase 3 maturadora de protease foram isoladas de clones de *Enterobacter Cloacae* subsp. *cloacae* ATCC 13047. A diversidade dessas enzimas na microbiota intestinal dos cupins demonstra a importância fisiológica das hidrogenases em ecossistemas complexos (Ballor & Leadbetter, 2012) e auxilia na adaptabilidade desses micróbios no ecossistema onde estão inseridos (Boyd et al., 2009).

BIOPOLÍMEROS

Polihidroxialcanoato (PHA)

Um dos mais graves problemas ambientais da atualidade é o descarte incorreto no meio ambiente de polímeros de origem petroquímica que podem levar até 500 anos para se degradar (Organização das nações unidas [ONU], 2023); entretanto, segundo a BNEF Economic Scenario (2022), até 2050, a tendência é que a demanda global por matérias-primas petroquímicas como Polietileno (PE), Polipropileno (PP) e Tereftalato de polietileno (PET), cresça até 90% em comparação com a demanda atual, chegando a 403 milhões de toneladas métricas por ano. A questão ambiental e a previsão de aumento da demanda global por matérias-primas petroquímicas mostram que existe um grave problema a ser resolvido: Como produzir mais plástico com menor impacto ambiental?

Nessa conjuntura, emergem polímeros de origem biológica como o Polihidroxialcanoato (PHA), porém a penetração desses produtos no mercado é limitada por fatores como altos custos e falta de apoio regulatório. Empresas como a PHB Industrial S/A que atua na produção de PHB (um tipo de Polihidroxialcanoato) utilizando melaço de cana de açúcar, entretanto, o uso de monossacarídeos como fontes de carbono para a fermentação dos bioplásticos e de biocombustíveis como o etanol para produção de intermediários químicos inibe a produção de polímeros de origem biológica a preços competitivos (Barbato & Pamplona, 2022). Com isso, o uso de açúcares maiores (como celulose e hemicelulose) e moléculas mais complexas (como lignina) pode representar uma fonte de substrato de carbono altamente competitiva para os microrganismos produtores dos biopolímeros. O uso eficiente dessas fontes de carbono ainda é bastante limitado, principalmente pela falta de rotas metabólicas capazes de degradar moléculas maiores.

Em pesquisa na plataforma NCBI, não foi encontrado nenhuma proteína PHA sintase de cupins, entretanto, em uma busca por PHA sintases de *Pseudomonas* foram encontrados 58 resultados sendo 46 resultados de *Pseudomonas* sp. Nawaz et al. 2023 apresentaram *Pseudomonas* presentes no intestino de cupins da espécie *Reticulitermes speratus* que eram sintetizadoras de Polihidroxialcanoatos (poliésteres de origem microbiana que atuam no armazenamento de energia e nutrientes). A bactéria, nomeada *Pseudomonas* sp. Hu109A, possuía genes que sintetizam enzimas oxidativas (como lacases e desidrogenases) e enzimas que realizam a biossíntese de Polihidroxialcanoatos (PHA sintases). Sujatha e colaboradores (2005) realizaram uma análise de PHA sintases de *Pseudomonas* sp. utilizando a técnica PCR, foram encontradas sequências de nucleotídeos com mais de 16 sintases de poli- β -hidroxi-alcanoato (PHA) e poli- β -hidroxi-butirato (PHB).

Ácidos orgânicos

Ácidos orgânicos são biomoléculas que contém um ou mais grupos de ácidos carboxílicos e estão presentes em animais, plantas e microrganismos; pode-se citar como exemplo de ácidos orgânicos, o ácido cítrico, o ácido lático e

o ácido succínico. Os ácidos orgânicos possuem uma ampla gama de usos em diversas indústrias como a alimentícia e de cosmética podendo serem usados como “blocos de construção químicos” substituindo commodities químicas oriundas de hidrocarbonetos fósseis.

Em uma busca realizada na plataforma NCBI por proteínas que realizam a síntese de ácido lático de cupins foram encontrados 264 resultados, sendo 45 da microbiota intestinal do cupim. Em outra busca realizada na mesma plataforma em 16 de dezembro de 2023 por proteínas malato desidrogenase (enzimas usadas na produção de ácido succínico) foram encontrados 114 resultados, sendo 14 da microbiota intestinal do cupim.

Bauer et al. (2000) descobriram bactérias de ácido lático com abundância representativa na microbiota intestinal de cupins da espécie *Reticulitermes flavipes* e outros cupins que se alimentam de madeira, tais como *Nasutitermes arborum*, *Thoracotermes macrothorax* e *Anoplotermes pacificus*. Nessas espécies citadas, as bactérias lácticas representam de 43 a 54% das colônias intestinais. Ramos et al. (2020) elaboraram uma rota produtiva para a produção de ácido acrílico a partir da desidratação do ácido lático. O ácido acrílico é uma matéria prima química com demanda considerável que é produzida majoritariamente pela rota petroquímica, sendo aplicada na produção de resinas e têxtil. Outra aplicação potencial do ácido lático é na produção do ácido polilático, polímero termoplástico usado na produção de embalagens e dispositivos médicos (Riaz et al., 2018).

Sakamoto e Ohkuma (2013), apresentam uma cepa denominada Rs-03(T), bactéria obrigatoriamente anaeróbica, que foi isolada do intestino de cupim, não pigmentada, não formadora de esporos, Gram-negativa e em formato de bastonete. Essa cepa tem atividade sacarolítica (promotora de acidificação por intermédio da fermentação da lactose) e apresentou produção de ácido succínico. Esse ácido orgânico é uma importante matéria-prima para a produção de produtos químicos dentre os quais podemos citar o 1-4 butanodiol (Baidya et al., 2019), aplicado na produção de fibras elásticas usuais na engenharia de tecido e na produção de Polibutileno tereftalato (PBT). Esta resina é usada na produção de componentes eletrônicos e automotivos, e o Polibutileno succinato (PBS), que é produzido a partir da

combinação dos ácidos succínico e adípico, chamado poli succinato de butileno- co -butileno adipato (PBSA).

CONCLUSÃO

Os artigos analisados e a busca por proteínas para a produção de bioprodutos nos bancos genéticos sinalizam que a microbiota dos cupins representa uma verdadeira matriz para a prospecção de processos produtivos sustentáveis e de alto valor agregado utilizando a biomassa como matéria prima. Porém, ainda existe um hiato entre o conhecimento científico e a aplicação industrial. Os exemplos de plantas pilotos para produção destes produtos ainda são incipientes. Ficou claro também a necessidade de experimentos em grande escala que demonstrem a viabilidade produtiva desses bioprocessos, além de estudos que indiquem um potencial de competitividade das matérias-primas químicas de origem biológica ante semelhantes de origem fóssil.

REFERÊNCIAS

- Abedi, E., & Hashemi, S. M. B. (2020). Lactic acid production – producing microorganisms and substrates sources-state of art. *Heliyon*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03785>
- Andrey, G. B., & Pamplona, J. B. (2022). Os desafios para a difusão dos bioplásticos no Brasil. *Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental*. <https://doi.org/10.5585/gestao.v11n1.a123>
- Bajpai, P. (2023). Chapter 8 - Industrial applications of thermophilic/hyperthermophilic enzymes. In *Developments and Applications of Enzymes from Thermophilic Microorganisms* (pp. 105-208). Academic Press.
- Ballor, N. R., & Leadbetter, J. R. (2012). Patterns of [FeFe] hydrogenase diversity in the gut microbial communities of lignocellulose-feeding higher termites. *Applied and Environmental Microbiology*, 78(15), 5154–5162. <https://doi.org/10.1128/AEM.00598-12>
- Bauer, S., Tholen, A., Overmann, J., & Brune, A. (2000). Characterization of abundance and diversity of lactic acid bacteria in the hindgut of wood- and soil-feeding termites by molecular and culture-dependent techniques. *Archives of Microbiology*, 173(2), 126-137. <https://doi.org/10.1007/s002039900120>
- Body, E. S., Spear, J. R., & Peters, J. W. (2009). [FeFe] hydrogenase genetic diversity provides insight into molecular adaptation in a saline microbial mat community. *Applied and Environmental Microbiology*, 75(13), 4365–4373.
- BloombergNEF. (2022). A breakneck growth pivot nears for green hydrogen. Retrieved May 25, 2024, from <https://about.bnef.com/blog/a-breakneck-growth-pivot-nears-for-green-hydrogen/>
- BloombergNEF. (2022). The world's addiction to plastic in five charts. Retrieved May 25, 2024, from <https://about.bnef.com/blog/the-worlds-addiction-to-plastic-in-five-charts/>
- Brune, A. (2006). Symbiotic association between termites and prokaryotes. In M. Dworkin, S. Falkow, E. Rosenberg, K.H. Schleifer, & E. Stackebrandt (Eds.), *The Prokaryotes* (3rd ed., pp. 439–474). Springer Science.
- Chestney, N. (2023). World needs \$2.7 trillion annually for net zero emissions by 2050, Wood Mackenzie report says. *Reuters*.
- DiCosimo, R., McAuliffe, J., Poulouse, A. J., & Bohlmann, G. (2013). Industrial use of immobilized enzymes. *Chemical Society Reviews*, 42(16), 6437–6474. <https://doi.org/10.1039/C3CS60015G>
- Eimear Hegarty et al. (2023). Halogenases for the synthesis of small molecules. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 41, 100784. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2023.100784>
- Gavande, P. V., Goyal, A., & Fontes, C. M. G. A. (2023). Chapter 1 - Carbohydrates and Carbohydrate-Active Enzymes (CAZyme): An overview. In *Developments and Applications of Enzymes from Thermophilic Microorganisms* (pp. 1-20). Academic Press.
- Gunasekaran, P., & Chandra Raj, K. (1999). Ethanol fermentation technology – *Zymomonas mobilis*. *Current Science*, 77(1), 56-68.
- Hegarty, E., Büchler, J., Buller, R. M., et al. (2023). Halogenases for the synthesis of small molecules. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 41, 100784.
- Huazhang Liu et al. (2017). Wüstite-based catalyst for ammonia synthesis: Structure, property and performance. *Catalysis Today*, 297, 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2017.06.015>
- Jeschke, P. (2017). Latest generation of halogen-containing pesticides. *Pest Management Science*, 73(6), 1053–1066. <https://doi.org/10.1002/ps.4522>
- Kankiya Chanitnun et al. (2012). Glucose(xylose) isomerase production by *Streptomyces* sp.CH7 grown on agricultural residues. *Brazilian Journal of Microbiology*, 43(3), 693–700.
- Katahira, S., Tokuhira, T., Muramoto, N., Takahashi, H., Moriya, S., & Okuma, S. (2011). XYLOSE ISOMERASE AND USE THEREOF (JP n° 2011147445 A). Toyota Central Research & Development; RIKAGAKU KENKYUSHO.
- Keramidas, K., Mima, S., & Bidaud, A. (2024). Opportunities and roadblocks in the decarbonisation of the global steel sector: A demand and production modelling approach. *Energy and Climate Change*, 5(100121). <https://doi.org/10.1016/j.ecochg.2024.100121>

- Latham, J., et al. (2017). Development of Halogenase Enzymes for Use in Synthesis. *Chemical Reviews*, 118(1), 232–269.
- Lee, K.E., & Wood, T.G. (1971). *Termites and Soils*. Academic Press.
- Liu, Y., & Whitman, W.B. (2008). Metabolic, phylogenetic, and ecological diversity of the methanogenic archaea. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1125(1), 171–189.
- Lennart J.J van de Peppel et al.(2010). Ancestral predisposition toward a domesticated lifestyle in the termite-cultivated fungus *Termitomyces*. *Current Biology*, 31(19), 4413–4421.
- Lopes, J.G., Santos, K.C., & Costa, A.A.(2017). Prospecção tecnológica do uso do bagaço de cana-de-açúcar visando a produção de etanol de segunda geração.
- Lopes, K., Martins, E.M., & Miranda, R.L.(2019). A potencialidade energética da biomassa no Brasil.*RDS*, 5(1), 94–106.
- Mattéotti, C., et al.(2011). New glucosidase activities identified by functional screening of a genomic DNA library from the gut microbiota of the termite *Reticulitermes santonensis*. *Microbiological Research*, 166(8), 629–642.
- Medema, M.H., et al.(2021). Mining genomes to illuminate the specialized chemistry of life. *Nature Reviews Genetics*, 22(553–571).
- Mendiburu, A.Z., et al.(2022). Ethanol as a renewable biofuel: Combustion characteristics and application in engines. *Energy*, 257(124688).
- Mores, S. et al.(2021). Citric acid bioproduction and downstream processing: Status, opportunities, and challenges. *Bioresource Technology*, 320(124426).
- Nawaz, M.Z. et al.(2023). Genomic insights into the metabolic potential of a novel lignin-degrading and polyhydroxyalkanoates producing bacterium *Pseudomonas sp. Hu109A*. *Chemosphere*, 310(136754).
- Ohkuma, M.(2003). Termite symbiotic systems: efficient bio-recycling of lignocellulose. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 62(1–9).
- Ono.(2023). Turning off the Tap: How the world can end plastic pollution and create a circular economy. *United Nations Environment Programme*. ISBN:978-92-807-4024-0.
- Pandeeti, E.V.P. et al.(2019). Chapter 9 - Emerging Trends in the Industrial Production of Chemical Products by Microorganisms. *Recent Developments in Applied Microbiology and Biochemistry*. Academic Press. Pages 107–125. ISBN 9780128163283.
- Pester, M.; Brune, A.(2007). Hydrogen is the central free intermediate during lignocellulose degradation by termite gut symbionts. *ISME Journal*, 1(551–565).
- Poltronieri, P., Kumar, P.(2017). Polyhydroxyalkanoates (PHAs) in Industrial Applications. *Handbook of Ecomaterials*. Springer.
- Purdy, K.J.(2007). The Distribution and Diversity of Euryarchaeota in Termite Guts. *Advances in Applied Microbiology*, 62(63–80).
- Ramos, R.M.V. et al.(2020). Desidratação do ácido láctico para obtenção de ácido acrílico. In ENCONTRO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA EMBRAPA AGROENERGIA, Brasília, DF. Anais. Brasília, DF: Embrapa.
- Riaz, S. et al.(2018). Metabolic Engineered Biocatalyst: A Solution for PLA Based Problems. *International Journal of Biomaterials*.
- Saini, M. et al.(2016)... Production of biobutanol from cellulose hydrolysate by the *Escherichia coli* co-culture system. *FEMS Microbiol Lett*.
- Scharf, M.E., & Boucias, D.G.(2010). Potential of termite-based biomass pretreatment strategies for use in bioethanol production. *Insect Science*, 17(166–174).
- Singh Chauhan, P., Bhattacharya, S.(2019). Hydrogen gas sensing methods, materials, and approach to achieve parts per billion level detection: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(47), 26076–26099.
- Sundus, R. et al.(2018). Metabolic Engineered Biocatalyst: A Solution for PLA Based Problems. *International Journal of Biomaterials*.
- Vasan, P.T. et al.(2011). Cellulosic ethanol production by *Zymomonas mobilis* harboring an endoglucanase gene from *Enterobacter cloacae*. *Bioresource Technology*, 102(3), 2585–2589.
- Watanabe, H., & Tokuda, G.(2010). Cellulolytic systems in insects. *Annual Review of Entomology*, 55(609–623).
- Warnecke, F. et al.(2007). Metagenomic and functional analysis of hindgut microbiota of a wood-feeding higher termite. *Nature*, 450(7169), 560–565.
- Zheng, H. et al.(2013). Comprehensive phylogenetic diversity of [FeFe]-hydrogenase genes in termite gut microbiota. *Microbes Environ.*, 28(4), 491–494.