



BIOTECNOLOGIA MICROBIANA E SUAS APLICAÇÕES NO MEIO AMBIENTE

Romero Brandão Costa
Ana Lúcia Porto
Daniela Viana Marques
Raphael Andrade Silva
Kethylen Cardoso

Maria Clara do Nascimento
Anna Gabrielly Neves
Kétura Rhammá Ferreira
Thiago Pajeú Nascimento

Biotecnologia microbiana e suas aplicações no meio ambiente



Todo o conteúdo apresentado neste livro é de
responsabilidade do(s) autor(es).
Esta obra está licenciada com uma Licença
Creative Commons Atribuição-SemDerivações
4.0 Internacional.

Conselho Editorial

Prof. Dr. Ednilson Sergio Ramalho de Souza - UFOPA
(Editor-Chefe)
Prof. Dr. Laecio Nobre de Macedo-UFMA
Prof. Dr. Aldrin Vianna de Santana-UNIFAP
Prof^a. Dr^a. Raquel Silvano Almeida-Unespar
Prof. Dr. Carlos Erick Brito de Sousa-UFMA
Prof^a. Dr^a. Ilka Kassandra Pereira Belfort-Faculdade Laboro
Prof^a. Dr. Renata Cristina Lopes Andrade-FURG
Prof. Dr. Elias Rocha Gonçalves-IFF
Prof. Dr. Clézio dos Santos-UFRRJ
Prof. Dr. Rodrigo Luiz Fabri-UFJF
Prof. Dr. Manoel dos Santos Costa-IEMA
Prof.^a Dr^a. Isabella Macário Ferro Cavalcanti-UFPE
Prof. Dr. Rodolfo Maduro Almeida-UFOPA
Prof. Dr. Deivid Alex dos Santos-UEL
Prof.^a Dr^a. Maria de Fatima Vilhena da Silva-UFPA
Prof.^a Dr^a. Dayse Marinho Martins-IEMA
Prof. Dr. Daniel Tarciso Martins Pereira-UFAM
Prof.^a Dr^a. Elane da Silva Barbosa-UERN
Prof. Dr. Piter Anderson Severino de Jesus-Université Aix Marseille

Nossa missão é a difusão do conhecimento gerado no âmbito acadêmico por meio da organização e da publicação de livros científicos de fácil acesso, de baixo custo financeiro e de alta qualidade!

Nossa inspiração é acreditar que a ampla divulgação do conhecimento científico pode mudar para melhor o mundo em que vivemos!

Equipe RFB Editora

Romero Marcos Pedrosa Brandão Costa
Ana Lúcia Figueiredo Porto
Daniela de Araújo Viana Marques
Raphael Luiz Andrade Silva
Kethylen Barbara Barbosa Cardoso
Maria Clara do Nascimento
Anna Gabrielly Duarte Neves
Kétura Rhammá Cavalcante Ferreira
Thiago Pajeú Nascimento

(Organizadores)

Biotecnologia microbiana e suas aplicações no meio ambiente

1ª Edição

Belém-PA
RFB Editora
2023

© 2023 Edição brasileira
by RFB Editora
© 2023 Texto
by Autor
Todos os direitos reservados

RFB Editora
CNPJ: 39.242.488/0001-07
Home Page: www.rfbeditora.com
Email: adm@rfbeditora.com
Telefone: 91988857730
Belém, Pará, Brasil

Editor-Chefe:
Prof. Dr. Ednilson Souza
Diagramação:
Worges Editoração
Revisão de texto e capa:
Organizadores

Bibliotecária:
Janaina Karina Alves Trigo
Ramos-CRB 8/9166
Produtor editorial:
Nazareno Da Luz

Dados Internacionais de Catalogação na publicação (CIP)



B616

Biotecnologia microbiana e suas aplicações no meio ambiente / Romero Marcos Pedrosa Brandão Costa *et al.* (Organizador). – Belém: RFB, 2023.

Outros organizadores:

Ana Lúcia Figueiredo Porto
Daniela de Araújo Viana Marques
Raphael Luiz Andrade Silva
Kethylen Barbara Barbosa Cardoso
Maria Clara do Nascimento
Anna Gabrielly Duarte Neves
Kétura Rhammá Cavalcante Ferreira
Thiago Pajeú Nascimento

Livro em PDF

ISBN 978-65-5889-588-6

DOI 10.46898/rfb.d4017828-3bf9-450a-a176-f8bb32ab4973

1. Da bancada ao mercado: inovação tecnológica impulsionando a microbiologia industrial. I. Costa, Romero Marcos Pedrosa Brandão *et al.* (Organizador). II. Título.

CDD 570

Índice para catálogo sistemático

I. Biologia.

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO 7

CAPÍTULO 1

DA BANCADA AO MERCADO: INOVAÇÃO TECNOLÓGICA
IMPULSIONANDO A MICROBIOLOGIA INDUSTRIAL..... 9

Isadora Mendes da Fonseca
Aline Ferreira Sobral
Kethylen Barbara Barbosa Cardoso
Nilson Fernando Barbosa da Silva
Thiago Pajeú Nascimento
Raphael Luiz Andrade Silva
Ana Lúcia Figueiredo Porto
Romero Marcos Pedrosa Brandão Costa
DOI: 10.46898/rfb.9786558895886.1

CAPÍTULO 2

BIONANOTECNOLOGIA APLICADA À AGRICULTURA E SEUS
IMPACTOS NO MEIO AMBIENTE..... 27

Micheline Thais dos Santos
Dario Vittor Araujo Paiva
João Manoel da Silva
Juanize Matias da Silva Batista
Ana Lúcia Figueiredo Porto
DOI: 10.46898/rfb.9786558895886.2

CAPÍTULO 3

BIOINSETICIDAS EXTRAÍDOS DE MICRORGANISMOS FO-
TOSSINTETIZANTES E SUA APLICAÇÃO NO CONTROLE DO
Aedes aegypti..... 45

Vivianne Lays Ribeiro Cavalcanti
Daniela de Araújo Viana Marques
Raquel Pedrosa Bezerra
Romero Marcos Pedrosa Brandão Costa
DOI: 10.46898/rfb.9786558895886.3

CAPÍTULO 4
**BIOPROSPECÇÃO DE MICRORGANISMOS A PARTIR DE RESÍ-
DUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS AGROINDUSTRIAIS..... 71**

Nilson Fernando Barbosa da Silva
Juanize Matias da Silva Batista
Maria Clara do Nascimento
Anna Gabrielly Duarte Neves
Raphael Luiz Andrade Silva
Romero Marcos Pedrosa Brandão Costa
Ana Lúcia Figueiredo Porto
DOI: 10.46898/rfb.9786558895886.4

CAPÍTULO 5
**MICORREMEDIAÇÃO: UMA ABORDAGEM SUSTENTÁVEL
PARA TRATAR EFLUENTES DA INDÚSTRIA TÊXTIL 93**

Anna Gabrielly Duarte Neves
Raphael Luiz Andrade Silva
Adriane Caroline Batista Oliveira
Kethylen Barbara Barbosa Cardoso
Ana Lúcia Figueiredo Porto
Romero Marcos Pedrosa Brandão Costa
DOI: 10.46898/rfb.9786558895886.5

ÍNDICE REMISSIVO..... 109

APRESENTAÇÃO

A Biotecnologia Microbiana oferece soluções para desafios complexos no campo da preservação ambiental. Com entusiasmo, apresentamos o livro “Biotecnologia Microbiana: E Suas Aplicações no Meio Ambiente,” uma obra que mergulha profundamente no mundo dos microrganismos e revela o impacto transformador que eles têm em nosso planeta.

Este livro representa uma jornada emocionante pelo reino microbiano, explorando as inúmeras maneiras pelas quais os microrganismos podem ser utilizados para melhorar nossa qualidade de vida e proteger o ambiente que nos cerca. Uma parte significativa do livro é dedicada a explorar como os microrganismos podem ser usados para mitigar problemas ambientais urgentes, incluindo a biorremediação de poluentes e a promoção da agricultura sustentável. A obra é resultado da colaboração de especialistas e pesquisadores renomados que compartilham suas perspectivas e experiências, tornando-a uma fonte confiável e abrangente de conhecimento. Preparamos esta obra para inspirar e informar, e esperamos que ela sirva como um guia essencial para a próxima geração de cientistas, ambientalistas e visionários da biotecnologia. Junte-se a nós nesta emocionante jornada rumo a um futuro mais sustentável e saudável.

Romero Marcos Pedrosa Brandão Costa

CAPÍTULO 1

DA BANCADA AO MERCADO: INOVAÇÃO TECNOLÓGICA IMPULSIONANDO A MICROBIOLOGIA INDUSTRIAL

Isadora Mendes da Fonseca¹

Aline Ferreira Sobral²

Kethylen Barbara Barbosa Cardoso³

Nilson Fernando Barbosa da Silva⁴

Thiago Pajeú Nascimento⁵

Raphael Luiz Andrade Silva⁶

Ana Lúcia Figueiredo Porto⁷

Romero Marcos Pedrosa Brandão Costa⁸

DOI: 10.46898/rfb.9786558895886.1

1 Instituto de Ciências Biológicas - ICB, Universidade de Pernambuco.

2 Instituto de Ciências Biológicas - ICB, Universidade de Pernambuco.

3 Departamento de Morfologia e Fisiologia Animal - Universidade Federal Rural de Pernambuco.

4 Departamento de Morfologia e Fisiologia Animal - Universidade Federal Rural de Pernambuco.

5 Campus Professora Cinobelina Elvas - Universidade Federal do Piauí.

6 Instituto de Ciências Biológicas - ICB, Universidade de Pernambuco.

7 Departamento de Morfologia e Fisiologia Animal - Universidade Federal Rural de Pernambuco

8 Campus Professora Cinobelina Elvas - Universidade Federal do Piauí.

RESUMO

A microbiologia industrial representa uma área científica de grande importância, focada na pesquisa e aplicação de microrganismos em processos industriais para a produção de diversos bens e serviços com base em conhecimentos científicos consolidados. Nesse contexto, bactérias, leveduras, fungos e microalgas são amplamente explorados, dando origem a uma variedade de produtos. O objetivo do capítulo é analisar o conhecimento científico sobre microrganismos em processos industriais, visando a produção de bens e serviços de interesse comercial, ambiental e social. Os avanços em biologia molecular e metagenômica têm ampliado o conhecimento em microbiologia industrial, permitindo a identificação de novos genes e enzimas com potencial industrial. Além disso, as pesquisas em microbiologia contribuem significativamente para a preservação do meio ambiente, por meio de biorremediação, produção de biocombustíveis e gestão de resíduos. Contudo, a regulamentação e os desafios éticos são fundamentais para garantir a segurança e a distribuição justa dos benefícios provenientes dessa área. É crucial avaliar cuidadosamente os riscos e benefícios envolvidos, bem como promover o acesso democrático ao conhecimento científico e às tecnologias biotecnológicas. Busca-se, assim, o progresso contínuo e a aplicação responsável da microbiologia industrial, visando um futuro mais sustentável.

Palavras-chaves: Bioprodutos; biomateriais; sustentabilidade; biotecnologia; microrganismos.

1. INTRODUÇÃO

A microbiologia industrial tem como objetivo estudar e aplicar microrganismos em processos industriais, visando a produção de bens e serviços por meio da utilização de conhecimentos científicos básicos

sobre esses microrganismos com potencial para obter produtos e/ou processos de interesse comercial, ambiental e social (ZHENG X., ZHENG P. & SUN, 2019). Bactérias, leveduras, fungos e microalgas são alguns dos microrganismos com habilidades metabólicas únicas que podem ser exploradas de maneira controlada para produzir uma ampla variedade de produtos e serviços, incluindo fármacos, vacinas, componentes para diagnóstico, alimentos, bebidas, polímeros, combustíveis, produtos agropecuários e tratamento de resíduos. À medida que avançamos no mundo da microbiologia industrial, é fundamental enfatizar a importância contínua de análises sobre tendências e perspectivas nessa área em constante evolução. A rápida expansão do conhecimento científico, juntamente com os avanços tecnológicos, oferece novas oportunidades para explorar o potencial dos microrganismos e suas técnicas em diversos setores industriais, especificamente no desenvolvimento sustentável e na busca por soluções inovadoras para desafios presentes na sociedade (BELOQUI, 2018).

Um dos principais campos de atuação da microbiologia industrial é a produção de bioativos, onde microrganismos como leveduras e bactérias convertem substratos orgânicos em produtos valiosos como álcool, ácidos orgânicos, enzimas, vitaminas e aminoácidos, por meio da fermentação. A fermentação alcoólica é um exemplo importante desse processo, utilizando microrganismos para transformar mostos (caldo de cana e/ou melaço) em álcool e gás carbônico (SOUZA *et al.*, 2022). O controle microbiológico é fundamental para o sucesso, evitando contaminações que poderiam prejudicar a eficiência e o rendimento industrial. O monitoramento microbiológico é essencial para detectar e combater contaminantes, garantindo a qualidade dos produtos finais, como cervejas, vinhos, iogurtes e queijos. A microbiologia industrial desempenha um papel

crucial na otimização da fermentação alcoólica e em outras aplicações fermentativas (CECCATO-ANTONINI, 2017)

Outra área importante da microbiologia industrial é a manipulação genética de microrganismos, é possível modificar suas características e capacidades metabólicas para a produção de substâncias específicas. Isso tem levado ao desenvolvimento de medicamentos, hormônios humanos, vacinas e proteínas terapêuticas, proporcionando avanços significativos na medicina e na saúde (OKAFOR, 2007). Além disso, a microbiologia industrial desempenha um papel fundamental no tratamento de efluentes e na biorremediação. Microrganismos são empregados para degradar poluentes e resíduos, transformando-os em compostos menos tóxicos e contribuindo para a preservação do meio ambiente. Esse tipo de aplicação é essencial para minimizar o impacto negativo das atividades industriais no ecossistema (OLIVEIRA, 2021).

Na indústria alimentícia, a microbiologia desempenha um papel crítico no controle de qualidade. A análise microbiológica é utilizada para garantir a segurança e a qualidade dos produtos, prevenindo a contaminação por microrganismos indesejados que podem causar doenças ou deteriorar o produto final. A higiene e a aplicação de boas práticas de manipulação são fundamentais para evitar a propagação de microrganismos patogênicos nos alimentos (REBELLO, 2010)

Sendo assim, a microbiologia industrial possibilita a produção eficiente e sustentável de uma grande variedade de produtos. Sua aplicação permite explorar o potencial dos microrganismos em benefício da sociedade, seja na produção de alimentos, medicamentos, produtos químicos ou no tratamento de resíduos. Ao compreender e utilizar adequadamente a microbiologia industrial, podemos

aperfeiçoar processos e contribuir para o desenvolvimento econômico e ambientalmente responsável.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Técnicas avançadas em Biologia Molecular e Microbiologia Industrial

A biologia molecular e a microbiologia industrial estão intrinsecamente interligadas, uma vez que a biologia molecular têm impulsionado significativos avanços no conhecimento dos processos celulares e no desenvolvimento de inovações biotecnológicas por meio de técnicas avançadas permitindo a identificação de alvos para a modificação genética com alta precisão. Por outro lado, a microbiologia industrial aproveita essas informações para projetar processos e equipamentos que permitam o cultivo em larga escala de microrganismos como bactérias, fungos e microalgas selecionados ou modificados, possibilitando a produção eficiente de compostos de interesse industrial (FÁVARO, L. D. L., 2012).

A metagenômica tem sido uma ferramenta poderosa na exploração da diversidade microbiana em ambientes industriais complexos, como usinas de tratamento de água e efluentes, indústrias alimentícias, farmacêuticas, de biocombustíveis, petróleo e gás. Enquanto as técnicas tradicionais de microbiologia se concentram em cultivar e estudar microrganismos isolados em laboratório, a metagenômica possibilita a investigação direta do material genético coletado em uma amostra ambiental, sem a necessidade de cultivo prévio (BEJARANO *et al*, 2018). Dessa forma, a metagenômica tem sido utilizada para identificar novos genes e enzimas com potencial industrial, analisar a diversidade microbiana em ambientes industriais e realizar descobertas de microrganismos produtores de

compostos de interesse industrial. Oferecendo assim novas perspectivas para melhorar a eficiência de processos, desenvolver produtos de maior valor agregado e reduzir o impacto ambiental das atividades industriais.

Outra técnica bastante utilizada é o PCR quantitativo em tempo real (qPCR), que possibilita a detecção e quantificação de microrganismos de interesse industrial associados a ecossistemas complexos, apresentando taxa de detecção rápida e alta sensibilidade, além de ser altamente específico e reprodutível ao longo do tempo. O qPCR pode ser usado, por exemplo, para acompanhar a progressão da fermentação em tempo real. Isso permite que os cientistas monitorem o crescimento dos microrganismos produtores e a produção do composto desejado, possibilitando ajustes no processo para otimizar a produção e aumentar o rendimento (WANG, 2008).

Sendo essencial para o controle de qualidade, permitindo rastrear patógenos e contaminantes em produtos e ambientes industriais, garantindo assim a segurança e qualidade dos produtos finais. (VACCALLUZZO *et al*, 2023). Na indústria alimentícia, o qPCR é empregado para detectar e quantificar microrganismos patogênicos ou indesejáveis, como bactérias patogênicas e leveduras deteriorantes. Essa técnica permite avaliar a qualidade e a segurança dos produtos ao longo da cadeia de produção, desde a matéria-prima até o produto final, garantindo a conformidade com os padrões de segurança alimentar (Liang *et al.*, 2018)..

Em aplicações de biorremediação, onde microrganismos são utilizados para degradar poluentes e resíduos, o qPCR pode ser usado para quantificar a população de microrganismos degradadores no ambiente, monitorando sua eficiência ao longo do tempo. e para quantificar microrganismos indicadores de poluição em efluentes industriais tratados, permitindo avaliar a eficácia dos processos de

tratamento e garantindo que os efluentes estejam dentro dos limites aceitáveis de segurança ambiental (PÉREZ-LLANO *et al.*, 2017).

Por sua vez, o sistema CRISPR-Cas9 é uma das descobertas mais revolucionárias em biologia molecular. Essa técnica de edição genética permite a modificação precisa de sequências de DNA em microrganismos. Na microbiologia industrial, o CRISPR-Cas9 é aplicado para melhorar linhagens de produção, aumentando sua capacidade de sintetizar compostos específicos ou tornando-os mais resistentes a condições adversas. Essa abordagem tem o potencial de acelerar a otimização de microrganismos para a produção industrial de uma ampla gama de produtos, desde biocombustíveis até produtos farmacêuticos. (SOUZA & PEREIRA, 2017)

Além das técnicas de biologia molecular e edição genética, é fundamental destacar os equipamentos industriais essenciais para o cultivo eficiente de microrganismos na microbiologia industrial. Dois dos principais equipamentos utilizados são os fermentadores e os biorreatores. Os fermentadores são equipamentos projetados para proporcionar condições ideais de cultivo de microrganismos em larga escala. Eles são amplamente empregados em processos fermentativos, nos quais microrganismos metabolizam substratos para produzir compostos de interesse, além de oferecerem controle preciso de parâmetros como temperatura, pH, agitação, oxigenação e nutrição, garantindo um ambiente favorável ao crescimento e à produção do microrganismo. O controle rigoroso dessas variáveis permite alcançar altas taxas de crescimento e produtividade (CHISTI & MOO-YOUNG, 2020).

Biorreatores, por sua vez, são equipamentos similares aos fermentadores, porém com a capacidade de oferecer também um controle mais sofisticado sobre parâmetros ambientais, neles é possível ajustar fatores adicionais, como a luz, a intensidade luminosa e a concentração

de gás carbônico. Dessa forma, os biorreatores permitem o controle otimizado das variáveis ambientais, maximizando a produção de biomassa e compostos de interesse. Eles são utilizados principalmente em cultivos de microrganismos que requerem condições específicas, como microalgas e cianobactérias (CHISTI & MOO-YOUNG, 2020).

2.2. Produção de biomateriais e bioprodutos

Uma outra área na qual têm se empregado o uso de microrganismos é para a produção de biomateriais e bioprodutos. Essa utilização parte da necessidade de se substituir os atuais produtos formulados pela indústria, que na maioria das vezes contam para sua produção com métodos ou equipamentos complexos e altamente custosos, matéria-prima com alto teor de toxicidade e que necessita de longos períodos para a sua degradação (HERNÁNDEZ-ARRIAGA, CAMPANO & RIVERO-BUCETA, 2021). Nesse sentido, os microrganismos se apresentam como uma alternativa fundamental, pois, demandam de pequenas áreas para esporulação e fermentação, compostos nutricionais de fácil aquisição, sendo estes muitas vezes representados por subprodutos de diversos setores industriais, métodos simples de análise além de ofertarem uma gama de metabólitos secundários com potencial para a produção de biomateriais de interesse comercial (KOUR *et al.*, 2021).

Uma das principais aplicações da microbiologia na indústria hoje é para a produção de enzimas, uma vez que os microrganismos podem ser cultivados de forma rápida e econômica em larga escala. Além disso, as enzimas obtidas têm diversas aplicações biotecnológicas em diferentes setores industriais, trazendo benefícios significativos para a produção de uma ampla gama de biomateriais e bioprodutos. Alinhado a isto, a enzimologia por si só já oferece diversas vantagens econômicas e sustentáveis, como pode ser visto na tabela a seguir.

Além das aplicações mencionadas, a produção de enzimas por microrganismos continua a avançar, impulsionada por técnicas de engenharia genética e biologia sintética. Isso permite a modificação e otimização de enzimas para atender a demandas específicas, ampliando ainda mais as possibilidades de aplicações biotecnológicas (ARBIGE, SHETTY & CHOTANI, 2019). Além disso, a formulação de enzimas tem avançado no quesito de revestimentos que protegem a bioatividade e permitem a liberação controlada do produto final, ampliando a ação e durabilidade do bioproduto. Outros processos downstream simples, como uso direto do caldo de fermentação, podem ser adequados para produtos industriais de baixo custo, enquanto métodos de fermentação e separação simultâneos podem evitar etapas de purificação demoradas (ARBIGE, SHETTY & CHOTANI, 2019). A patente BR1020180748173A2 é um dos exemplos das tendências citadas acima, acoplando um sistema fermentativo a processos de purificação, unindo o Upstream ao Downstream e conseqüentemente, reduzindo processos, custos e resíduos. Da mesma forma, BR1020200033646A2 propõe sistema de duas fases aquosas, acoplado a cromatografia, tornando o processo mais rápido e garantindo maior eficiência na purificação da enzima de interesse.

A busca por soluções seguras e sustentáveis impulsiona a inovação e aprimoramento contínuo na indústria biotecnológica, proporcionando soluções cada vez mais eficientes e eficazes para os desafios enfrentados em diversos setores industriais e terapêuticos e os microrganismos despontam cada vez mais nesse sentido.

2.3. Regulamentação e Desafios Éticos

A regulamentação é essencial para garantir a segurança dos trabalhadores envolvidos no processo industrial, do meio ambiente e do consumidor. Agências reguladoras desempenham um papel

fundamental nesse contexto, estabelecendo padrões, diretrizes e normas para o uso seguro dos microrganismos modificados. Dentre as principais agências reguladoras mundiais na área da microbiologia industrial, destacam-se a Food and Drug Administration (FDA) nos Estados Unidos, a European Medicines Agency (EMA) na Europa e no Brasil, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Essas agências são responsáveis por avaliar a segurança e eficácia dos produtos biotecnológicos antes de sua comercialização, bem como por monitorar sua utilização contínua no mercado (KOTHA *et al.*, 2018; PATEL *et al.*, 2020). Além destas, temos órgãos de propriedade intelectual, que atuam na regulamentação e aplicação dos direitos referentes às invenções e tecnologias desenvolvidas no país.

Apesar dos benefícios trazidos pela biotecnologia industrial, diversos avanços tecnológicos na área a tornam potencialmente perigosa para a sociedade, a manipulação de microrganismos geneticamente modificados pode representar riscos potenciais, como a disseminação de cepas virulentas ou a introdução de novas características no ambiente que podem ter impactos imprevisíveis (PAKSERESHT, EDENBRANDT & LAGERKVIST, 2021). Portanto, agências reguladoras devem estabelecer diretrizes claras para a avaliação e aprovação de processos industriais que envolvam microrganismos modificados, bem como para a monitorização contínua de suas atividades (KOTHA *et al.*, 2018).

Outro desafio ético é a distribuição justa do desenvolvimento da microbiologia industrial e seus benefícios, garantindo que estes não sejam limitados a determinadas regiões do planeta ou grupos sociais, garantindo a inclusão e desenvolvimento sustentável (ASVELD *et al.*, 2018). Para alcançar essa distribuição justa, é necessário implementar políticas e estratégias que promovam a democratização do conhecimento científico e o acesso a tecnologias biotecnológicas em países

em desenvolvimento ou menos favorecidos. A responsabilidade em enfrentar esse desafio recai sobre a comunidade científica, os governos, as agências reguladoras e a sociedade como um todo, em busca de uma microbiologia industrial que contribua para um futuro mais inclusivo e próspero (KHAN *et al.*, 2015).

No cenário brasileiro, é encorajador destacar o surgimento de projetos inovadores que buscam atuar no desenvolvimento da microbiologia industrial de forma sustentável e humanizada (CNPq, 2022). É importante destacar o esforço do desenvolvimento de tecnologias alinhadas à Agenda 2030 e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Sendo assim, é claro o desenvolvimento de tecnologias e práticas inovadoras em sintonia com os ODS, priorizando a utilização responsável de microrganismos modificados e a produção de biomateriais sustentáveis. Por meio da aplicação da biotecnologia é possível promover a produção eficiente de insumos associada à redução de resíduos e impactos ambientais (ROSETO-DELGADO *et al.* 2020). Ao mesmo passo, a promoção de pesquisa e a capacitação em microbiologia industrial em regiões menos favorecidas provocam a redução das desigualdades regionais, impulsiona a economia local e fomenta o empreendedorismo.

A bioética também desempenha um papel importante nesse cenário, pois envolve a reflexão sobre os valores e princípios éticos relacionados à manipulação de microrganismos. É necessário ponderar os riscos e benefícios envolvidos, considerando sempre o bem-estar humano, a sustentabilidade ambiental e o respeito aos direitos dos seres vivos (Pontigo & Villegas-Delgadillo, 2020).

3. CONCLUSÃO

A microbiologia industrial é crucial para o avanço da ciência e da tecnologia, permitindo a exploração do potencial dos microrganismos em diversos setores industriais. Tem se beneficiado enormemente das técnicas avançadas em biologia molecular e metagenômica, permitindo a manipulação genética de microrganismos para produzir substâncias específicas de interesse industrial. A utilização de equipamentos industriais, como fermentadores e biorreatores, possibilita o cultivo eficiente em larga escala desses microrganismos, otimizando a produção de compostos valiosos. A importância da microbiologia industrial também é evidente na área da saúde, onde a pesquisa em probióticos, prebióticos, terapia com bacteriófagos e terapia celular promete avanços significativos no tratamento de doenças e na promoção do bem-estar humano. Além disso, está contribuindo para a preservação do meio ambiente, com aplicações inovadoras em biorremediação, produção de biocombustíveis e gestão de resíduos orgânicos. Essas soluções sustentáveis ajudam a reduzir o impacto ambiental das atividades industriais e a promover a conservação dos recursos naturais. No entanto, a regulamentação adequada e os desafios éticos são essenciais para garantir a segurança e a distribuição justa dos benefícios trazidos pela microbiologia industrial. Agências reguladoras e a comunidade científica têm a responsabilidade de garantir que as aplicações da microbiologia industrial sejam seguras e éticas, e que o conhecimento e as tecnologias sejam acessíveis a todos. Com o contínuo progresso da microbiologia industrial e sua aplicação responsável, podemos vislumbrar um futuro mais sustentável, com soluções inovadoras para os desafios da sociedade, contribuindo para o desenvolvimento econômico e ambientalmente responsável. A microbiologia industrial, portanto, se mostra como uma aliada poderosa na busca por um mundo mais saudável, próspero e equilibrado.

4. REFERÊNCIAS

ARBIGE, M. V., SHETTY, J. K., CHOTANI, G. Industrial enzymology: The next chapter. **Trends in Biotechnology (Elsevier Current Trends)**, v. 37, n. 12, p. 1355-1366, 2019.

ASVELD, L., OSSEWEIJER, P., POSADA, J. A. Societal and ethical issues in industrial biotechnology. **Advances in Biochemical Engineering / Biotechnology**. v. 173, p. 121-141. 2018.

BARROS, D. M. *et al.* A importância do consumo de probióticos e prebióticos para a saúde: uma revisão. **Brazilian Applied Science Review**, v. 6, n. 1, p. 54-63, 2022.

BELOQUI, A. *et al.* Recent trends in industrial microbiology. **Current Opinion in Microbiology**, v. 11, n. 3, p. 240-248, 2008.

CARLI, G. J. *et al.* A revolucionária técnica de edição genética “CRISPR”. **Genética na Escola**, v. 12, n. 2, p. 114-23, 2017.

CECCATO-ANTONINI, S. R. Microbiologia da fermentação alcoólica: a importância do monitoramento microbiológico em destilarias. São Paulo, **coleção UAB-UFSCar**, 2017.

CIESIELSKI, S., VAZ-MOREIRA, I. **Advances in industrial and environmental microbiology**. Applied Sciences (Multidisciplinary Digital Publishing Institute), v. 11, n. 20, p. 9774, 2021.

CHISTI, Y., MOO-YOUNG, M. Fermentation Technology, Bioprocessing, Scale-Up and Manufacture. **Biotechnology - The Science and the Business**, p. 177-222, 2020.

COONEY, J.; SEBEK, O. **Developments in Industrial Microbiology**, 1988.

CNPq. **Revista: Edição 70 anos**. Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq. 2022.

FÁVARO, L. D. L. **Melhoramento genético de microrganismos para produção de biocombustíveis e químicos renováveis: integração de abordagens de biologia molecular, biologia sistêmica, biologia sintética e engenharia metabólica.** *Agroenergia em Revista*, ed. 5, p. 32-35, dez. 2012.

HERNÁNDEZ-ARRIAGA, A. M. *et al.* **When Microbial Biotechnology Meets Material Engineering.** *Microbial Biotechnology*. *Microbial Biotechnology*, v. 15, n. 1, p. 149–63. jan. 2022

KHAN, M. S. *et al.* **Some Ethical Perspectives in the Discipline of Microbiology.** *The International Journal of Ethics, Trauma & victimology*, v. 1, n. 02, p. 45–50, dez. 2015.

KOTHA, V. *et al.* Regulatory strategy for registration of combination products to US-FDA. **International Journal of Drug Regulatory Affairs**, v. 2, n. 3, p. 27–42, 2018.

KOUR, D. *et al.* Beneficial Microbiomes for Bioremediation of Diverse Contaminated Environments for Environmental Sustainability: Present Status and Future Challenges. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 20, p. 24917–39, 2021.

LIANG, H. *et al.* Dynamics and diversity of a microbial community during the fermentation of industrialized *Qingcaipaocai*, a traditional Chinese fermented vegetable food, as assessed by illumina seq sequencing, DGGE and QPCR assay. *Annals of Microbiology*, v. 68, n. 2, p. 111–22, fev. 2018.

LÓPES, P. L., VILLEGAS-DELGADILLO, R. N. Bioethics applied in a public health research. **Mexican Bioethics Review ICSA**, v. 2, n. 3, p. 11–15, 2020.

MARQUES, C. *et al.* Prebióticos e probióticos na saúde e no tratamento de doenças intestinais: uma revisão integrativa. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 10, p. e6459109071–e6459109071, 2020.

MENEZES, L. H. Q.; DE CASTRO, R. B. R.; ROCHA, E. M. F. Identificação de leveduras selvagens de um fermento de levedo industrial durante a produção de Bioetanol – um biocombustível renovável. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 1, p. 5260–5267, 2022.

OKAFOR, N. & BENEDICT, C. O. *Modern Industrial Microbiology and Biotechnology*. **Taylor&Francis**, v. 2, 2020.

OLIVEIRA, D. C. D. S. *et al.* Processos biológicos para o tratamento de efluentes: uma revisão integrativa. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 8, n. 18, p. 397–415, 2021.

OSPINO BEJARANO, K. A. *et al.* Resistencia microbiana desde una perspectiva metagenómica. **Nova**, v. 16, n. 29, p. 91–100, 2018.

PATEL, P. *et al.* A baseline analysis of regulatory review timelines for ANVISA: 2013–2016. **Therapeutic Innovation & Regulatory Science**, v. 54, n. 6, p. 1428–35, novembro de 2020.

PAKSERESHT, A. *et al.* Genetically modified food and consumer risk responsibility: The effect of regulatory design and risk type on cognitive information processing. **PLOS ONE**, v. 16, n. 6, p. e0252580, 2021.

PERES, J., JUNIOR, E., GAZZONI, D. Biocombustíveis uma oportunidade para o agronegócio brasileiro. **Revista de Política Agrícola**, v. 14, n. 1, p. 31–41. 2005.

PÉREZ-LLANO, Y. *et al.* Omics Approaches: Impact on Bioremediation Techniques. *Approaches in Bioremediation: The New Era of Environmental Microbiology and Nanobiotechnology*, organizado por Ram Prasad e Elisabet Aranda, **Springer International Publishing**, p. 43–59. dez. 2017.

REBELLO, F. D. F. P.; GASPAR, A. Microorganismos e seus metabólitos utilizados na indústria de alimentos. **Revista Agrogeoambiental**, v. 2, n. 1, p.135-142, 2010.

ROSERO-DELGADO, E. A. et al. Biotechnology applied to treatments of agro-industrial wastes. **Advances in the Domain of Environmental Biotechnology**, p. 277–311. 2021.

SANTOS, M. P. D.; GIRARDELLO, R. Compostos com atividade antimicrobiana extraídos de microrganismos endofíticos isolados do bioma brasileiro. Anais do I Congresso Nacional de Microbiologia Clínica On-line. Anais. **Revista Multidisciplinar em Saúde**, 2 ago. 2021.

SILVA, H. *et al.* Estimativa teórica da geração anual de biogás pelo aterro sanitário do consórcio CIAS. **Revista DAE**, v. 68, n. 224, p. 23–33, 2020.

SOUSA, A. L.; RIZZATTO, M. L. Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos: uma revisão. **Scientific Electronic Archives**, v. 15, n. 2, 31 jan. 2022.

SOUZA, Carolina Montes Durões de, *et al.* Probióticos e a indústria de alimentos: Uma visão geral. **Alimentos: Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente**, vol. 1, n. 3, p. 63–85, 2020.

SOUZA, T. A. J. de; PEREIRA, T. C. O impacto na sociedade da tecnologia de edição gênica com base no sistema CRISPR-Cas9. **Genética na Escola**, São Paulo, v. 12, n. 2, p. 124–131, 2017.

SOMACAL, S. Produção de ácidos graxos poli-insaturados por fermentação submersa. 17 dez. 2015.

VACCALLUZZO, A. *et al.* Quantitative PCR assay as a tool for the detection of lactobacilli in sicilian table olives produced at an industrial scale. **Fermentation**, v. 9, n. 4, p.355, abril de 2023.

WANG, MEI-YUN. et al. Monitoring Dark Hydrogen Fermentation Performance of Indigenous Clostridium Butyricum by Hydrogenase Gene Expression Using RT-PCR and qPCR. **International Journal of Hydrogen Energy**, v..33, n. 18, p. 4730–38, 2008.

WEISS, S.; LESCHNER, S. Bacteria - Fighters against cancer: Bacteria as promising tools for cancer therapy. **GIT Laboratory journal Europe**, 2010.

ZHANG, W., NIELSEN, D. R. Synthetic biology applications in industrial microbiology. **Frontiers in Microbiology** (Frontiers Media SA), v. 5, p. 451, 2014.

ZHENG, XIAOMEI, et al. Systems biology for industrial biotechnology. **Chinese Journal of Biotechnology**, v. 35, n. 10, pp. 1955-1973, 2019.

ZHU, XIANGYANG & MOHAMMED A. AL-MONIEE. Molecular microbiology techniques. **Trends in oil and gas corrosion research and technologies**, p. 513-536, 31, 2016.

CAPÍTULO 2

BIONANOTECNOLOGIA APLICADA À AGRICULTURA E SEUS IMPACTOS NO MEIO AMBIENTE

Micheline Thais dos Santos¹

Dario Vittor Araujo Paiva²

João Manoel da Silva³

Juanize Matias da Silva Batista⁴

Ana Lúcia Figueiredo Porto⁵

DOI: 10.46898/rfb.9786558895886.2

¹ Departamento de Morfologia e Fisiologia Animal - Universidade Federal Rural de Pernambuco.

² Departamento de Morfologia e Fisiologia Animal - Universidade Federal Rural de Pernambuco.

³ Centro de Ciências da Natureza- Universidade Estadual do Piauí

⁴ Departamento de Morfologia e Fisiologia Animal - Universidade Federal Rural de Pernambuco.

⁵ Departamento de Morfologia e Fisiologia Animal - Universidade Federal Rural de Pernambuco.

RESUMO

O uso intensivo de agrotóxico vem ocasionando sérios riscos à saúde humana e ao ecossistema. Em busca de alternativas menos agressivas, a bionanotecnologia traz inovação e eficiente produção de nanoprodutos, capazes de atenuar os impactos causados pelo uso dos agroquímicos. A síntese dos nanomateriais ocorre por método biológico através de extratos de plantas, algas, bactérias, fungos, vírus e outras biomoléculas. Porém os microrganismos ganham maior aceitação por serem de fácil manipulação, síntese menos onerosa e rápida reprodução facilitando a produção em escalonamento. Os nanomateriais de maior interesse aplicados à agricultura a partir da síntese de microrganismos são: nanofertilizantes, nanobiossensores, nanopesticidas, nanolarvicidas, nanoencapsulação e nanofungicidas. Eles têm o potencial de melhorar o desenvolvimento da cultura, prevenir a resistência de pragas, melhor aproveitamento de nutrientes, menos resíduos nocivos liberados no solo e na água, consequentemente menos danos ao meio ambiente. Isto posto, essa breve revisão narrativa foi realizada através de dados disponíveis em plataformas de dados científicos confiáveis (Science direct, Pubmed, Scopus e SpringerLink), a qual aborda tópicos à aplicação da bionanotecnologia na agricultura e os impactos causados no meio ambiente. Por fim, o uso da bionanotecnologia é de grande relevância na agricultura e para o meio ambiente. É uma ferramenta promissora no que tange o contexto de agricultura sustentável.

Palavras-chave: nanotecnologia verde, agricultura de precisão, microrganismos, nanopartículas metálicas, síntese verde.

1. INTRODUÇÃO

O uso excessivo de agroquímicos tem se tornado uma preocupação crescente entre pesquisadores, produtores agrícolas e a população em geral. Baseado em dados estatísticos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2021), anualmente são utilizadas aproximadamente 2,5 milhões de toneladas de agrotóxicos em todo o mundo, com o Brasil sendo responsável pelo consumo anual de mais de 300 mil toneladas de produtos comerciais. Esse cenário alarmante ressalta a dependência da agricultura moderna em relação a produtos químicos sintéticos para enfrentar desafios como pragas, doenças e estresses ambientais.

Os danos causados pelo uso indiscriminado de agroquímicos são enormes e causam impactos negativos tanto no meio ambiente como na saúde humana. Em 2019 a Resolução-RE nº 2.080, conhecida como Novo Marco Regulatório, classificou a toxicologia desses agroquímicos ao meio ambiente e à saúde humana em cinco categorias: I) extremamente tóxico; II) altamente tóxico; III) moderadamente tóxico; IV) pouco tóxico e V) improvável de causar dano agudo, além da inclusão do item considerado “não classificado”, válido para produtos de origem biológica com relação à baixíssimo potencial de dano (ANVISA, 2019).

Em decorrência dos resultados negativos provenientes do uso de defensivos agrícolas, novos produtos capazes de diminuir os problemas ambientais sem perder sua eficiência frente a cultura agrícola aplicada, têm sido pesquisados e desenvolvidos pela comunidade científica a fim de reverter os efeitos nocivos e garantir uma agricultura mais verde. A sustentabilidade na agricultura implica no uso mínimo de agroquímicos que possam eventualmente proteger

o meio ambiente e conservar diferentes espécies da extinção (SHANG *et al.*, 2019).

Assim, a bionanotecnologia se tornou uma grande aliada no processo de agricultura sustentável, reduzindo a quantidade de agroquímicos utilizados nas culturas. O termo bionanotecnologia, nanotecnologia verde ou nanobiotecnologia, tem por característica específica a utilização do método de síntese de nanomateriais por via biológica. Esses materiais apresentam propriedades óptica, elétrica, magnética, térmica e mecânica diferenciadas, quando comparados às suas contrapartes maiores (JEEVANANDAM *et al.*, 2018). Considerando o avanço da nanotecnologia nas mais diferentes áreas do conhecimento, principalmente a bionanotecnologia, este capítulo pretende abordar a aplicação dessa ferramenta na agricultura correlacionando seus impactos ao meio ambiente.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Impactos causados por agroquímicos no meio ambiente

O uso excessivo de agrotóxicos vem acompanhado de diversas apreensões ambientais e, de acordo com dados registrados pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis (IBAMA, 2022), em 2021 as vendas de agroquímicos foram de 719,5 mil toneladas de ingredientes ativos, estando entre os produtos mais comercializados no país: Glifosato e seus sais; 2,4-D; Mancozebe; Atrazina; Acefato; Malationa; Cletodim; Enxofre e S-metolacloro.

A maneira indiscriminada de como esses defensivos agrícolas vêm sendo utilizados tem acarretado em inúmeras consequências danosas ao meio ambiente, resultando no enfraquecimento da biodiver-

cidade, diminuição da população de insetos polinizadores, destruição do habitat de pássaros, ameaça espécies em extinção e quando esses produtos são usados em doses elevadas ocorre o aumento dos níveis de poluição no solo e na água (RAWTANI *et al.*, 2018), alterando de forma irreversível a ecologia química do solo e, como consequência, a redução da área disponível para a produção agrícola.

Segundo Sabarwal *et al.* (2018), mais de 90% dos inseticidas usados são perdidos por lixiviação no solo, processo de degradação (fotólise, hidrólise) e atividades microbianas. Apenas uma pequena quantidade de pesticidas atinge o local-alvo (1%), o que exige a aplicação repetida de pesticidas e resulta em aumento de custo e poluição do ecossistema (ANANDHI *et al.*, 2020). Esse fato ocorre também com os demais defensivos agrícolas utilizados no plantio (fungicidas, fertilizantes, herbicidas, larvicidas, entre outros), afetando quase todo o reino animal e a cadeia alimentar, causando alterações indesejadas a ponto de gerar grandes preocupações.

2.2. Nanotecnologia

A nanotecnologia é considerada uma área multidisciplinar, onde engloba o design, a fabricação e a aplicação de nanomateriais. Esses nanomateriais podem ser conceituados como materiais que apresentam ao menos uma dimensão na escala nanométrica (de 1 a 100 nm), capaz de apresentar propriedades distintas, tais como óptica, elétrica, magnética, térmica e mecânica, quando comparados às suas contrapartes maiores (JEEVANANDAM *et al.*, 2018).

Por definição etimológica, o prefixo nano é uma palavra de origem grega 'nanos', correspondente a diminuição de tamanho ou tempo. Assim, o termo nanômetro (nm) quando referido como unidade de medida, equivale a um (01) bilionésimo de um (01) metro

(m), ou seja, $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$. Materiais em nanoescala possuem propriedades químicas, ópticas, mecânicas, elétricas e magnéticas que podem ser aplicadas nos mais diversos setores da ciência, da ciência da computação, da engenharia e, mais recentemente, empregada nas áreas biomédicas e ambientais (RIBEIRO *et al.*, 2022).

As nanopartículas metálicas vêm sendo exploradas para diversas finalidades por apresentarem características únicas e por alterem consideravelmente as propriedades físicas, químicas e biológicas devido à sua relação superfície-volume, principalmente na agricultura, concretizando o conceito de agricultura moderna e de precisão, contribuindo para a produção da cultura e diminuindo os impactos causados por materiais químicos no meio ambiente (ZHANG *et al.*, 2016).

2.3. Bionanotecnologia - Aplicação na Agricultura e no Meio Ambiente

A nanotecnologia verde ou bionanotecnologia, é uma tecnologia que transforma materiais em tamanho nanométricos através do método biológico (plantas, bactérias, fungos, leveduras e microalgas). A nanotecnologia pode melhorar os processos agrícolas, como a qualidade do solo e a qualidade dos produtos agrícolas, usando fertilizantes à base de nanopartículas ou estimulando o crescimento das plantas. Além disso, reduz o uso de fertilizantes e pesticidas usando carreadores e compostos à base de nanopartículas sem reduzir a produtividade (DUHAN *et al.*, 2017).

A aplicação da bionanotecnologia na agricultura ocorre através da remediação ambiental, tratamento de água, detecção e controle de pragas e desenvolvendo nanozeólitas porosas capazes de absorver água ou contaminantes químicos do solo (RAHMAN *et al.*, 2022); também de sintetizar nanocápsulas capazes de liberar a con-

centração necessária de pesticidas sob demanda (CHEN *et al.*, 2022); através de nanomembranas que controlam a liberação de água, fertilizantes e herbicidas servindo como purificadores de água (INTISAR *et al.*, 2022); desenvolvimento de bionanosensores capazes de monitorar solo, plantas, detectar contaminantes e pragas (GHULAM *et al.*, 2022) e síntese de nanopartículas magnéticas como agente de combate aos contaminantes do solo (SPANOS *et al.*, 2021).

Através da nanotecnologia ocorreu o surgimento de diversas alternativas de aplicação na agricultura que vão desde a produtividade vegetal até sua interação com os microrganismos e o impacto na saúde do solo. Os nanomateriais desenvolvidos pela ciência têm mostrado efetividade na alternância aos agroquímicos comercializados, como a síntese das nanopartículas metálicas (DOS SANTOS *et al.*, 2023).

As nanopartículas podem ser aplicadas de forma individual ou associadas com bioinoculantes promotores de crescimento vegetal em diferentes órgãos da planta para diminuir ou substituir o uso de defensivos agrícolas (SALEEM *et al.*, 2023). Além do mais, as nanopartículas apresentam alta produtividade vegetal, como é mencionado por Rana *et al.* (2021), onde o uso de nanopartículas de zinco aumentou o rendimento de grãos de *Pennisetum americanum* L. (milheto) em 38%, bem como seu acúmulo de clorofila em 24%, quantidade de proteína solúvel total em 39% e a biomassa em 12%, relatando aumento da produtividade das plantas decorrente do uso de nanopartículas. Desse modo, a síntese verde de NPs, nanoemulsões e nanoencapsulação tem sido usada para reduzir o uso de fertilizantes, aumentar a produtividade e melhorar o manejo das culturas, proteger as sementes e diminuir os impactos negativos no meio ambiente (SANTOS *et al.*, 2019).

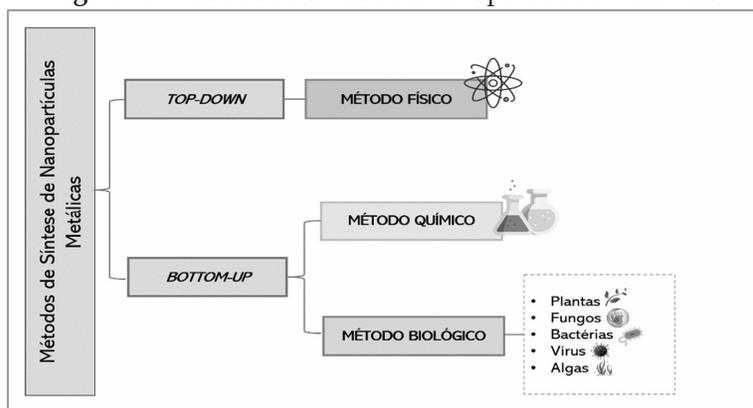
2.4. Síntese de nanopartículas metálicas por microrganismos

A síntese verde tornou-se um dos métodos mais preferidos para superar os efeitos adversos da síntese física e química, como condições críticas de temperatura e pressão, produtos químicos caros e tóxicos ao meio ambiente, longo tempo de refluxo de reação, subprodutos tóxicos, menor estabilidade das moléculas etc. (JAIN *et al.*, 2020). Os métodos existentes para síntese de nanopartículas metálicas (MNPs) são o físico, químico e biológico (figura 1), que se utilizam de abordagens do tipo, *top-down* consistindo na quebra sucessiva do metal no seu tamanho convencional até atingir tamanho nanométrico e, *bottom-up* consiste na construção de nanomateriais pelo agrupamento de átomos e partículas subatômicas (HANDOKO *et al.*, 2019; LEE & JUN, 2019).

No entanto, a síntese biológica de nanopartículas metálicas é considerada um método limpo, simples, econômico e ecologicamente correto por não utilizar substâncias químicas nocivas ao meio ambiente e equipamentos caros. Esse método utiliza-se de diversas biomoléculas, especialmente as oriundas de bactérias, leveduras, fungos filamentosos, cogumelos e plantas (GOMES, 2019). A abordagem empregada é do tipo *bottom-up*, onde ocorre a redução dos íons metálicos (provenientes de uma solução aquosa de sal metálico) a MNPs pela ação de enzimas e metabólitos secundários ou fitoquímicos, no caso de extratos vegetais (ABDELGHANY *et al.*, 2018; SIDDIQI *et al.*, 2018). Esses biocompostos, além de atuarem na redução do metal, também agem na estabilização das nanopartículas metálicas, diminuindo a possibilidade de agregação e mantendo a atividade biológica desses nanomateriais (ZEWDE *et al.*, 2016). Os microrganismos, bactérias e fungos tolerante a metais, são importantes nanofábricas capazes de

acumular e desintoxicar metais pesados devido à presença de várias enzimas redutases aptas a reduzir sais metálicos às nanopartículas metálicas (MNPs). A síntese de nanomateriais usando extratos de plantas pode ser mais fácil do que a síntese microbiana, no entanto, a síntese microbiana é mais econômica e livre de qualquer variação sazonal e do estágio de crescimento da planta (SINGH *et al.*, 2023).

Figura 1. Métodos de síntese de nanopartículas metálicas



Fonte: autores (2023).

Bactérias e fungos podem sintetizar nanopartículas de duas maneiras, por meio de mecanismos intracelular e, o mais utilizado, extracelular (ALSAMHARY, 2020). A síntese extracelular de MNPs (Figura 2) compreende o aprisionamento de íons metálicos na superfície externa das células e sua redução na presença de enzimas ou biomoléculas, enquanto a síntese intracelular ocorre dentro das células microbianas (SIDDIQI *et al.*, 2018).

Figura 2. Síntese verde extracelular de nanopartículas metálicas de prata



Fonte: autores (2023).

2.5. Microrganismos Sintetizadores de Nanomateriais Aplicados à Agricultura

Os microrganismos são importantes nanofábricas capazes de acumular e desintoxicar metais pesados devido à presença de várias enzimas redutases com capacidade de reduzir sais metálicos a nanopartículas metálicas (BAHRULOLUM *et al.*, 2021). Nos últimos anos, algumas ferramentas baseados em nanotecnologia foram desenvolvidas para melhorar o que chamamos de agricultura de precisão, melhorando as culturas usando nanomateriais ou nanomateriais de engenharia contra vários estresses abióticos e bióticos, como nanobiofertilizantes, nanopesticidas; nanobiossensores, descontaminação do solo, nanoherbicidas, nanofungicidas, nanolarvicidas e nanoInseticidas (Tabela 1), com capacidades antibacteriana, antifúngica, anti-inflamatória, antioxidante e ópticas (SONAWANE *et al.*, 2021; AN *et al.*, 2022; KUMARI *et al.*, 2023).

Tabela 1: Nanomateriais sintetizados por microrganismos e suas aplicações na agricultura

Nanopartícula	Microrganismo	Aplicação Agrícola	Referências
AgNP	<i>Aspergillus versicolor</i>	Nanofungicida	Elgorban et al. 2016
AgNP	<i>Streptomyces capillispiralis</i> Ca-1 <i>Streptomyces zaomyeticus</i> Oc-5 <i>Streptomyces pseudogriseolus</i> Acv-11	nanobactericida nanofungicida Biocatalisadores Nanolarvicida	Fouda et al., 2019
AgNP	<i>Lactobacillus casei</i> ssp. <i>casei</i> CCM 7088	Estimulador do crescimento vegetal, nanobactericida, nanofungicida	Singh et al., 2014
CuNP	<i>Endophytic actinomycetes</i> Ca-1	Nanopesticidas	Hassan et al., 2018
CdsNP	<i>Lactobacillus acidophilus</i> DSMZ 20079T	Nanobiossensor	Riaz et al. 2020

Fonte: autores (2023).

Essas inovadoras formulações que se baseiam na nanotecnologia, empregam bionanopartículas como veículos para o transporte, liberação controlada e entrega precisa de nutrientes essenciais ao sistema radicular das plantas. A incorporação de nutrientes em escala nanométrica permite melhorar a absorção pelas plantas, reduzir perdas por lixiviação e volatilização, além de mitigar a contaminação ambiental, caracterizando os nanofertilizantes como promissores aliados para uma agricultura mais sustentável (PIRZADAH *et al.*, 2019).

A nanoencapsulação desempenha um papel vital na proteção do meio ambiente, reduzindo a lixiviação e a evaporação de substâncias nocivas (DUHAN *et al.*, 2017). Os nanopesticidas, além dos benefícios agrícolas diretos, apresentam potencial de redução dos impactos ambientais, ao proporcionarem uma aplicação mais precisa

e controlada, eles mitigam a contaminação dos solos e a lixiviação dos compostos químicos para os corpos hídricos. A consequente preservação da qualidade da água é essencial para a manutenção dos ecossistemas aquáticos e a promoção da biodiversidade (ASIF *et al.*, 2021).

Os nanobiossensores tem recebido muita atenção devido ao seu desempenho rápido, específico e seletivo na detecção de toxinas e patógenos de plantas (MOCAN *et al.*, 2017). O uso de nanofungicidas é uma estratégia eficaz contra patógenos fúngicos, esses nanomateriais atuam na entrega direcionada e biodisponibilidade maximizada devido à maior solubilidade e permeabilidade, doses mais baixas, menor toxicidade dependente da dose e liberação controlada (HAQ *et al.*, 2019).

5. CONCLUSÕES

A bionanotecnologia vem revolucionando o setor agrícola com a produção e aplicação dos diversos nanomateriais empregados em alternância aos agroquímicos convencionais, por melhorar o desempenho do plantio e minimizar os impactos ambientais que tanto têm preocupado ambientalistas, produtores e população em geral. O uso dos microrganismos na síntese de nanomateriais vem se destacando na área científica e no mercado pela eficiência dos resultados, facilidade de manipulação, boa produção em escala, método limpo, econômico e amigável ambientalmente, fornecendo as condições necessárias para uma agricultura sustentável e de precisão. No entanto, é necessário que haja mais estudo relacionados a exploração de linhagens de microrganismos diversificando e aprimorando a síntese de nanomateriais aplicados às atividades agrícolas, com intuito de diminuir o uso indiscriminado de agroquímicos tóxicos à saúde humana e ao ecossistema.

6. REFERÊNCIAS

ABDELGHANY, T. M.; AL-RAJHI, A. M.; AL ABBOUD, M. A.; ALAWLAQI, M. M.; GANASH MAGDAH, A.; HELMY, E. A.; MABROUK, A. S. Recent advances in green synthesis of silver nanoparticles and their applications: about future directions. A review. **BioNanoScience**,8, 5-16, 2018.

ALSAMHARY, K. I. Eco-friendly synthesis of silver nanoparticles by *Bacillus subtilis* and their antibacterial activity. **Saudi Journal of Biological Sciences**, 27(8), 2185-2191, 2020.

AN, C.; SUN, C.; LI, N.; HUANG, B.; JIANG, J.; SHEN, Y.; et al. Nanomaterials and nanotechnology for agrochemical delivery: Strategies for sustainable agriculture. **J. Nanobiotechnology**, 20,2022.

ANANDHI, S.; SAMINATHAN, V.R.; YASOTHA, P.; SARAVANAN, P.T.; VENUGOPAL, R. Nano-pesticides in pest management. **Journal of Entomology and Zoology Studies.**; 8(4):685–690, 2020.

ANVISA. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Reclassificação toxicológica**. 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/anvisa-vai-reclassificar-todos-os-agrotoxicos-que-estao-no-mercado>. Acesso em: 10 Jul 2023.

ASIF, M.; et al. “Nano pesticides application in agriculture and their impact on environment”. agricultural development in Asia - Potential use of nano-materials and nano-technology, organizado por Md. Asaduzzaman e MafruhaAfroz, **IntechOpen**, 2022.

BAHRULOLUM, H., NOORAEI, S., JAVANSHIR, N. et al. Green synthesis of metal nanoparticles using microorganisms and their application in the agrifood sector. **J Nanobiotechnol**, 19, 86, 2021.

CHEN, H.; ZHI, H.; FENG, B.; CUI, B.; ZHAO, X.; SUN, C.; WANG, Y.; CUI, H.; ZHANG, B.; ZENG, Z. Quaternary ammonium chitosan

thermoresponsivenanocapsules with controlled release of pesticides on demand and maximum synergistic biological activity. **J. Agric. Food Chemistry**.70 :7653–7661, 2022.

DOS SANTOS, O.A.L.; SNEHA, M.; DEVARANI, T.; BOUOUDINA, M.; BACKX, B.P.; VIJAYA, J.J.; BELLUCCI, S. Review – Perovskite/ Spinel based graphene derivatives electrochemical and biosensors. **J.Electrochem. Sociedade**, 168:067506, 2021.

DUHAN JS, KUMAR R, KUMAR N, KAUR P, NEHRA K, DUHAN S. Nanotechnology: the new perspective in precision agriculture. **Biotechnology Representative**, 15 :11–23, 2017.

ELGORBAN, A. M.; AREF, S. M.; SEHAM, S. M.; ELHINDI, K. M.; BAHKALI, A. H.; SAYED, S. R.; MANAL, M. A. Extracellular synthesis of silver nanoparticles using *Aspergillus versicolor* and evaluation of their activity on plant pathogenic fungi. **Mycosphere**, 7(6), 844-852, 2016.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Agricultura e Meio Ambiente. **Agrotóxicos no Brasil**. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agricultura-e-meio-ambiente/qualidade/dinamica/agrotoxicos-no-brasil#:~:text=Autores&text=Anualmente%20s%C3%A3o%20usados%20no%20mundo,mil%20toneladas%20de%20produtos%20comerciais>. Acesso em 05 Jul 2023.

FOUDA A., HASSAN S. E., ABDO A. M., EL-GAMAL M. S. Antimicrobial, antioxidant and larvicidal activities of spherical silver nanoparticles synthesized by endophytic *Streptomyces* spp. **Biol Trace Elem Res**. 195:707–24, 2019.

GHULAM, A.N.; DOS SANTOS, O.A.L.; HAZEEM, L.; PIZZORNO BACKX, B.; BOUOUDINA, M.; BELLUCCI, S. Graphene Oxide (GO) materials – Applications and toxicity in living organisms and environment. **J. Função. Biomater**. 13:77, 2022.

GOMES, D.M.D. Otimização da síntese verde de nanopartículas de prata para incorporação em gel Antimicrobiano, **Dissertação** (Mestrado em Biotecnologia) – UFAM. Manaus – AM, 2019.

HAQ, I.U.; IJAZ, S. Use of metallic nanoparticles and nanoformulations as nanofungicides for sustainable disease management in plants. In: *Nanobiotechnology in bioformulations*. Springer. p. 289–316, 2019.

HASSAN, S.E.L.D.; SALEM, S.S; FOUDA, A.; AWAD, M.A.; EL-GAMMAL, M.S.; ABDO, A.M. New approach for antimicrobial activity and bio-control of various pathogens by biosynthesized copper nanoparticles using endophytic actinomycetes. **J Radiat Res Appl Sci**.11:262–70, 2018.

IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Relatórios de comercialização de agrotóxicos - Boletim 2021**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/quimicos-e-biologicos/agrotoxicos/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos>Acesso em 23 Jul 2023

INTISAR, A.; RAMZAN, A.; SAWAIRA, T.; KAREEM, A.T.; HUSSAIN, N.; DIN, M.I.; BILAL, M. Iqbal HMN Occurrence, toxic effects, and mitigation of pesticides as emerging environmental pollutants using robust nanomaterials – A review. **Quimiosfera**.293:133538, 2022.

JAIN, D.; KOUR, R.; BHOJIYA, A. A.; MEENA, R. H.; SINGH, A.; MOHANTY, S. R.; et al. Zinc tolerant plant growth promoting bacteria alleviates phytotoxic effects of zinc on maize through zinc immobilization. **Sci. Rep.** 10, 13865, 2020.

JEEVANANDAM, J.; BARHOUM, A.; CHAN, Y. S.; DUFRESNE, A.; DANQUAH, M. K.; Beilstein **Journal of Nanotechnology**, 9, 1050, 2018.

KUMARI R, SUMAN K, KARMAKAR S, MISHRA V, LAKRA SG, SAURAV GK, MAHTO BK. Regulation and safety measures for nanotechnology-based agri-products. **Front Genome**, Ed. 21;5:1200987, 2023

LEE, S. H.; JUN, B. H. Silver nanoparticles: synthesis and application for nanomedicine. **International journal of molecular sciences**, 20(4), 865, 2019.

MOCAN, T., MATEA, C.T.; POP, T.; MOSTEANU, O.; BUZOIANU, A.D.; PUIA, C.; et al. Development of nanoparticle-based optical sensors for pathogenic bacterial detection. **J Nanobiotechnol.**;15(1):1-14, 2017.

NATIONAL CANCER INSTITUTE (NCI). Cancer and nanotechnology. Disponível em <https://www.cancer.gov/nano/cancer-nanotechnology>. Acesso em 24 jul 2023.

PIRZADAH, T. B., et al. Development of nano-bioformulations of nutrients for sustainable agriculture. nanobiotechnology in bioformulations, organizado por Ram Prasad et al., **Springer International Publishing**, p. 381-94, 2019.

RAWTANI D, KHATRI N, TYAGI S, PANDEY G. Nanotechnology-based recent approaches for sensing and remediation of pesticides. **J Environ Manage**, 206:749-762. 2018.

RAHMAN, R.O.A.; EL-KAMASH, A.M.; HUNG, Y.-T. Nano-Zeolite applications in wastewater treatment: an overview. **Water**.14 :137, 2022.

RANA, R.A.; SIDDIQUI, M.N.; SKALICKY, M.; BRESTIC, M.; HOSAIN, A.; KAYESH, E.; POPOV, M.; HEJNAK, V.; GUPTA, D.R.; MAHMUD, N.U.; et al. Perspectives of nanotechnology in the improvement of productivity and quality of horticultural crops. **Horticulturae**.7:332, 2021.

RIAZ, S.; RAZA, Z.A.; MAJEED, M.I. Preparation of cadmium sulfide nanoparticles and mediation thereof across poly (hydroxybutyrate) nanocomposite. **Polym Bull.** 77(2):775–91, 2020.

RIBEIRO, R., RENTES, B. R., ARRELARO, A. S. M., & KUHNEN, S. Nanotecnologia: aspectos básicos e o potencial de sistemas nanoestruturados contendo produtos naturais aplicados à medicina veterinária. *Ciência Animal e Veterinária: inovações e tendências* – **Editora Científica Digital**, Vol. 2, 2022

SABARWAL, A.; KUMAR, K.; SINGH, R.P. Hazardous effects of chemical pesticides on human health–Cancer and other associated disorders. **Environmental toxicology and pharmacology.** 63:103-114, 2018.

SALEEM, S.; KHAN, M.S. Phyto-interactive impact of green synthesized iron oxide nanoparticles and *Rhizobium Pusense* on morpho-physiological and yield components of greengram. **Plant Physiol. Bioquim.**194:146–160, 2023.

SANTOS, M.; LEITÃO DOS SANTOS, O.; FILHO, S.; SANTANA, J.; SOUZA, F.; BACKX, B. Can green nanoparticle synthesis be efficient all year round? **Chem. Technol.** 1:32–36. 2019.

SHANG, Y.; HASAN, M.K.; AHAMMED, G.J.; LI, M.; YIN, H.; ZHOU, J. Applications of nanotechnology in plant growth and crop protection: A Review. **Molecules**, 24, 2558, 2019.

SIDDIQI, K.S.; RAHMAN, U.R.; TAJUDDIN, A.; et al. Properties of zinc oxide nanoparticles and their activity against microbes. **Nanoscale Res Lett.**,13, 141, 2018.

SINGH, S.; SINGH, B.; YADAV, S.; GUPTA, A. Applications of nanotechnology in agricultural and their role in disease management. **Res J NanosciNanotechnol.**, 5:1–5, 2014.

SINGH, D.; JAIN, D.; RAJPUROHIT, D.; JAT, G.; KUSHWAHA, H.S.; SINGH, A.; MOHANTY, S.R.; AL-SADOON, M.K.; ZAMAN, W.;

UPADHYAY, S.K. Bacteria assisted green synthesis of copper oxide nanoparticles and their potential applications as antimicrobial agents and plant growth stimulants. **Front. Chem.**, 11:1154128, 2023. [h](#)

SONAWANE H., ARYA S., MATH S., SHELKE D. Myco-synthesized silver and titanium oxide nanoparticles as seed priming agents to promote seed germination and seedling growth of *Solanum lycopersicum*: a comparative study. **Int. Nano Lett.** 11, 371-379, 2021.

SPANOS, A.; ATHANASIOU, K.; IOANNOU, A.; FOTOPOULOS, V.; KRASIA-CHRISTOFOROU, T. Functionalized magnetic nanomaterials in agricultural applications. **Nanomaterials.** 11:3106, 2021.

ZEWDE, B.; AMBAYE, A.; STUBBS III, J.; RAGHAVAN, D. A review of stabilized silver nanoparticles—synthesis, biological properties, characterization, and potential areas of applications. **Nanomed**, 4(1043), 1-14, 2016.

ZHANG, X.-F.; LIU, Z.-G.; SHEN, W.; GURUNATHAN, S. Silver Nanoparticles: Synthesis, Characterization, properties, applications, and therapeutic approaches. **Int. J. Mol. Sci.**, 17, 1534, 2016.

CAPÍTULO 3

BIOINSETICIDAS EXTRAÍDOS DE MICRORGANISMOS FOTOSSINTETIZANTES E SUA APLICAÇÃO NO CONTROLE DO *Aedes aegypti*

Vivianne Lays Ribeiro Cavalcanti¹

Daniela de Araújo Viana Marques²

Raquel Pedrosa Bezerra³

Romero Marcos Pedrosa Brandão Costa⁴

DOI: 10.46898/rfb.9786558895886.3

¹ Departamento de Morfologia e Fisiologia Animal - Universidade Federal Rural de Pernambuco.

² Instituto de Ciências Biológicas - Universidade de Pernambuco

³ Departamento de Morfologia e Fisiologia Animal - Universidade Federal Rural de Pernambuco.

⁴ Instituto de Ciências Biológicas - Universidade de Pernambuco

RESUMO

O mosquito *Aedes aegypti* é o principal vetor de arboviroses como dengue, zika e chikungunya, causando impacto significativo na saúde pública. O controle populacional do mosquito é essencial para prevenir a transmissão dessas doenças, já que métodos eficazes comercialmente viáveis ainda são limitados. A pesquisa se baseou na busca por alternativas ao controle do *Aedes aegypti*, com foco em inseticidas naturais, em especial as lectinas. Estudos têm mostrado que as lectinas podem interferir na matriz peritrófica do intestino médio do inseto, comprometendo os processos digestivos e de absorção de nutrientes. Em particular, a lectina extraída da microalga *Chlorella vulgaris* (CvL) apresentou atividade larvicida contra as larvas de *Aedes aegypti*, sendo estável em diferentes condições de pH e temperatura, tornando-se uma nova alternativa viável para o controle das larvas do mosquito transmissor.

Palavras-chave: *Aedes aegypti*, dengue, controle de vetores, lectinas, microalgas.

1. INTRODUÇÃO

O mosquito do *Aedes aegypti* é o principal vetor das arboviroses como dengue, zika e chikungunya (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2016). Entre as doenças virais transmitidas por um vetor, a dengue tem sido a principal causadora de morte, necessitando de maior atenção e reforço da saúde pública (GUBLER, 2002; WHO, 1997). Em países tropicais o índice de pessoas acometidas pelo vírus é maior, pois as particularidades do clima favorecem, atuando negativamente sobre a saúde pública (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2016). Devido à falta de métodos eficazes que sejam comercialmente viáveis disponíveis contra a dengue e outras arboviroses transmitidas pelo *Aedes aegypti*, o controle popula-

cional do mosquito vetor é fundamental para prevenir a transmissão da doença (OMS, 2009).

O combate à dengue tem sido realizado por meio de inseticidas químicos usados no controle do *Aedes aegypti*, porém devido ao uso excessivo, têm provocado a resistência de insetos, levando conseqüentemente à diminuição do controle e aumento da transmissão de doenças (CARVALHO *et al.*, 2004; LUNA, 2004). Vale salientar ainda, que o uso de compostos químicos é altamente tóxico para os animais, incluindo os seres humanos.

Inseticidas são definidos por suas características principais de deterência, repelência, capacidade de inibir crescimento ou reprodução, bem como causar qualquer tipo de efeito deletério frente a insetos alvo (ADDOR, 1994; VIEGAS JÚNIOR, 2003). Entretanto, apenas a nocividade que o inseticida trará ao inseto não o torna completamente eficaz. Para ser considerado um inseticida viável deve ser eficiente mesmo em baixas concentrações sem promover toxicidade para outros animais, atóxico, ser manipulado facilmente e ter um custo acessível e econômico (ADDOR, 1994). Novas alternativas de controle do *Aedes aegypti* vêm sendo pesquisadas, inclusive, a utilização de inseticidas naturais.

Neste sentido, Lectinas tem sido estudadas como princípio ativo no controle das larvas de *Aedes aegypti* (OLIVEIRA *et al.*, 2016). Lectinas são proteínas ou glicoproteínas amplamente distribuídas nos seres vivos, de origem não imune que se ligam a carboidratos, capazes de aglutinar células e precipitar glicoconjugados, formando uma malha de hemaglutinação reversível (JUAN *et al.*, 2017). O interesse em lectinas nas aplicações em diferentes setores comerciais vem aumentando como citado em capítulos anteriores e, com isso, há necessidade de produção em larga escala de lectinas para suprir a demanda.

Poucos estudos relatam sobre lectinas de microalgas, o que caracteriza uma nova área inexplorada na biotecnologia de proteínas. Além de proteínas, outros bioativos podem ser extraídos da biomassa de microalgas. A busca por compostos bioativos a partir de microalgas vêm se tornando cada vez mais promissora, acompanhado da introdução crescente de espécies cultivadas a nível comercial, facilitando e viabilizando a obtenção destas moléculas de interesse. A produção controlada de microalgas é um fator essencial para explorá-las como uma fonte economicamente viável de importantes produtos. Há um potencial de descoberta de novos medicamentos a partir destes metabólitos compostos isolados de microalgas com atividade larvicida.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Dengue e controle do *Aedes aegypti*

A Dengue é, dentre as doenças virais de transmissão vetorial, a que mais causa impacto em termos de morbidade e mortalidade na população mundial, exigindo esforços e investimentos cada vez mais intensos dos serviços de saúde pública (GUBLER, 2002). O vírus dengue pertence à família Flaviviridae, que inclui aproximadamente 70 espécies, sendo que cerca de 30 deles causam doenças ao homem.

Alguns exemplos desta família incluem os vírus da febre amarela, encefalite do Oeste do Nilo, encefalite de St. Louis, Encefalite japonesa e Rocio. Esses vírus têm sido isolados nos mosquitos do gênero *Aedes*, subgênero *Stegomyia* e espécies *Aedes aegypti*, *Aedes Albopictus* e *Aedes polynesiensis* (WENGLER, 1991). Os flavivirus podem ser transmitidos por três espécies de mosquito, o *Aedes aegypti* (*A. aegypti*), *Aedes albopictus* (*A. albopictus*) e o *Aedes mediovittatus* (*gymnometopa*) (TORRES, 1990). Entretanto, populações de *A. Albopictus* existentes no

Brasil demonstram, experimentalmente, suscetibilidade e capacidade de veicular horizontalmente os 4 sorotipos do vírus do dengue e de transmitir verticalmente, por via transovariana, os sorotipos 1 e 4 desse vírus.

Os vetores da Dengue são mosquitos culicídeos do gênero *Aedes*. A principal espécie transmissora é *Aedes aegypti* embora outras espécies como *Aedes albopictus*, *Aedes scutellarise* e *Aedes polyniensis* tenham sido apontados principalmente na Ásia e na Oceania. A fonte de infecção é o hospedeiro vertebrado e o homem, embora tenha sido descrito, tanto na Ásia como na África, um ciclo selvagem envolvendo macacos (BRASIL, 2006; ROZENDAAL, 1997; RUEDA, 2004; CONSOLI; OLIVEIRA, 1994).

O *Aedes aegypti* apresenta distribuição nas regiões tropicais e subtropicais, limitadas entre as latitudes de 45°N e 35°S. Alguns fatores abióticos como chuva, temperatura, altitude, topografia, umidade, condicionam a sobrevivência desses vetores. É considerada espécie domiciliada, sendo sua convivência com o homem favorecida pela utilização de recipientes artificiais para o desenvolvimento de suas formas imaturas, condição ecológica que torna esta espécie essencialmente urbana (WHO, 2004). No Brasil, os organofosforados (OP) e os piretróides (P) destacam-se nos programas que visam a controlar insetos transmissores de doenças. Tais inseticidas químicos requerem monitoramento constante (LUNA, 2004), uma vez que há o desenvolvimento de resistência.

Portanto, a dengue é uma doença viral transmitida pelo mosquito *Aedes aegypti* causador de epidemias em todo o mundo. Apesar de pesquisas avançadas no intuito do desenvolvimento de vacinas contra o vírus, o método ainda encontra-se em fase de experimento. A patologia emerge rapidamente em muitas partes do mundo. Nos continentes Americano, Sudeste da Ásia e regiões Ocidentais do

pacífico são as mais afetadas. Sua incidência tem aumentado significativamente nos últimos 50 anos. A estimativa prevista é que entre 50 a 100 milhões de infecções aconteçam, anualmente, em mais de 100 países endêmicos, colocando em risco quase metade da população do planeta (WHO, 2013).

Em 1920, foi relatado o primeiro caso de Dengue no Brasil, porém durante 6 décadas subsequentes não houve mais relato do vírus no país. Em 1950 e 1960, o *Aedes aegypti* foi eliminado do Brasil e dos outros 17 países das Américas (TAUIL, 2002; NOGUEIRA *et al.*, 1999). Já em 1981/1982, o vírus voltou a se manifestar provocando um surto nos estados da Boa Vista, Roraima e posteriormente, em 1986 o Rio de Janeiro foi afetado pelo sorotipo 1 do vírus. (NOGUEIRA *et al.*, 1999). Ocorreu um novo surto em 1990/1991 promovendo cerca de 1952 casos de dengue hemorrágica causando 24 mortes pelo sorotipo 2 do vírus. Em 2000, no Rio de Janeiro foi realizado um isolamento com o sorotipo 3 do vírus, constatado como o mais virulento em relação ao demais (SCHATZMAYR, 2000), prosseguindo para os anos de 2001 e 2002 um enorme surto (FUNASA 2002).

No Brasil, com relação ao número de casos, retrospectivamente, no ano de 2011 foram notificados 344.715 casos. Em 2012 estes diminuíram para 190.294 registros, ambos no período de Janeiro a Março. Já em 2013, no mesmo período, somente os Estados de Rondônia, do Acre, do Amazonas, Tocantins, espírito Santo, Rio de Janeiro, Paraná, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, de Minas Gerais e Goiás contabilizaram um índice que abrange de 304,9 a 3.105 casos da doença por 100 mil habitantes (FUNDAÇÃO OSVALDO CRUZ, 2013).

Mais de 120 milhões sofrem da doença, sendo que mais de 40 milhões encontram-se gravemente incapacitadas ou apresentam deformações. Dos infectados, um terço vive na Índia, um terço na

África e o restante na Ásia, Pacífico Ocidental e nas Américas. No Brasil, Recife é a cidade com maior número de casos do país (FUNDAÇÃO OSVALDO CRUZ, 2013).

A ampla utilização de inseticidas químicos sintéticos no controle de vetores e em larga escala ocasiona problemas tanto na saúde quanto para o meio ambiente. Tal fato torna-se preocupante, pois o uso contínuo tem provocado como a contaminação do solo e da água, bem como malefícios ao homem, como a genotoxicidade e mutagenicidade causadas pelo temefós em concentrações similares àquelas utilizadas atualmente no combate ao *A.aegypti* (AIUB *et al.*, 2002). Com relação a atividade larvicida, o método de controle mais empregado atualmente para tais infestações é o uso de produtos químicos, acarretam custo elevado, desenvolvimento de resistência e possível ocorrência de resíduos do produto no ambiente. Em quantidade comercial, os inseticidas representaram 25,5% do total utilizado no Brasil. Além disso, no Brasil, em 2014, a classe de inseticidas foi a que respondeu pelo maior valor das vendas segundo o Instituto de Economia Agrícola – IEA (2015), sendo responsável por 39,9% do faturamento total de produtos agrícolas, ou seja, US\$4,89 bilhões. O combate à dengue realizado nos dias atuais tem sido por meio de inseticidas químicos usados no controle do *Aedes aegypti*, porém, devido ao uso excessivo os inseticidas químicos e a falta de ciclagem dos mesmos, têm se tornado um grande problema provocando a resistência de insetos, levando consequentemente a diminuição do controle e aumento da transmissão de doenças (CARVALHO *et al.*, 2004; LUNA, 2004).

Inseticidas são definidos por suas características principais de deterência, repelência, capacidade de inibir crescimento ou reprodução, bem como causar qualquer tipo de efeito deletério frente a insetos alvo (ADDOR, 1994; VIEGAS JÚNIOR, 2003). Entretanto, apenas a nocividade que o inseticida trará ao inseto não o torna

completamente eficaz. Para ser considerado um inseticida viável deve possuir algumas características, tais como: eficiência mesmo em baixas concentrações sem promover toxicidade para outros animais, ausência de fitotoxicidade, ser manipulado facilmente e ter um custo acessível e econômico. (ADDOR, 1994).

Novas alternativas de controle do *Aedes aegypti* vêm sendo pesquisadas, inclusive, a utilização de inseticidas naturais. Dentre as alternativas de inseticidas biodegradáveis está a lectina, uma proteína encontrada em plantas e microrganismos. As lectinas são proteínas ou glicoproteínas de origem não imune que se ligam a carboidratos, capazes de aglutinar células e precipitar glicoconjugados, formando uma malha de hemaglutinação reversível (GOLDSTEIN *et al.*, 1980). O interesse em biomoléculas, nas aplicações em diferentes setores comerciais vem aumentando e, com isso, há necessidade de produção em larga escala para suprir a demanda. Um método vantajoso para a indústria seria a exploração da biomassa de microrganismos fotossintetizantes.

2.2. Microrganismos fotossintetizantes e potencial biotecnológico

O termo “microalga” é utilizado, comumente, para designar algas eucarióticas, cianobactérias procarióticas, microrganismos fotossintéticos filamentosos ou unicelulares (MASOJÍDEK, *et al* 2010). Mesmo largamente distribuídas na natureza, não constituem um grupo de microrganismos tão estudado quanto bactérias e fungos, no âmbito biotecnológico. Prova disso é que dentre as dez mil espécies de microalgas documentadas na literatura, pouco mais de mil linhagens são mantidas em coleções ao redor do mundo, algumas centenas foram alvo de pesquisa por compostos químicos e apenas uma pequena

quantidade tem sido cultivada em escala industrial (OLAIZOLA, 2003).

As Clorófitas, ou algas verdes, envolvem um grupo vasto de organismos com uma grande variabilidade morfológica, desde formas microscópicas a macroscópicas, compreendendo quatro classes: *Micromonadophyceae*, *Carophyceae*, *Ulvophyceae* e *Chlorophyceae*. Possuem clorofila A e B e vários carotenóides, que são sintetizados e acumulados fora do cloroplasto sob condições de deficiência de nitrogênio e/ou outro tipo estresse, conferindo a alga uma cor laranja ou vermelho (OLAIZOLA, 2003). O produto de armazenamento é o amido, composto de amilose e amilopectina, que ao contrário das outras algas, é formado no interior do cloroplasto. A parede celular geralmente contém celulose. O grupo inclui organismos cocóides, flagelados unicelulares ou coloniais, filamentos multicelulares ou multinucleados. As algas verdes são cosmopolitas, sendo principalmente dulciaquícolas, mas um grande número de espécies também está presente em ambiente marinho, terrestre e subaéreo. Algumas espécies ocorrem em associações simbióticas, geralmente com líquens (MASOJÍDEK, *et al* 2010).

A exploração comercial de algas verdes microscópicas compreende relativamente poucos gêneros da classe *Chlorophyceae* entre os quais: *Chlorella*, *Dunaliella*, *Haematococcus* e *Botryococcus braunii* (TOMASELLI, 2008). A *Chlorella vulgaris* é uma alga unicelular dulciaquícola pertencente à classe *Chlorophyceae*, ordem *Chlorococcales* e família *Oocystaceae*. Apresenta forma de vida celular ou colonial, e pode acumular pigmentos como clorofila A e B, β -caroteno e xantofilas e sua principal fonte de reserva energética é o amido (WILSON & HUNER, 2000). O gênero *Chlorella* (*Chlorophyta*) é um gênero cosmopolita com pequenas células globulares (2-10 μm em diâmetro), que inclui espécies com tolerância a temperaturas diversificadas, já

que algumas podem crescer entre 15°C e 40°C (WILSON & HUNER, 2000).

Dentro do Estado de Pernambuco, cultivos industriais de microalgas seriam vantajosos, pelo fato de existirem elevadas temperaturas e intensidade luminosa durante o ano inteiro, que contribuiria para maior produção dessa biomassa em nossa região. A extração de bioativos de microalgas têm sido pouco explorada em nosso estado, o que abre possibilidades econômicas, uma vez que o cultivo das mesmas não é oneroso, necessitando de nutrientes simples e luz solar para sobreviver. Dentre esses bioativos a serem extraídos, estão as proteínas. O emprego de cultivos de microalgas na indústria biotecnológica para produção de lectinas é pouco conhecido, principalmente no Brasil.

O método de obtenção da biomassa de microrganismos fotossintetizantes é econômico e simples, pois são de fácil cultivo, necessitam de nutrientes de baixo custo para o crescimento celular, normalmente não são tóxicas, podem ser cultivadas durante todo o ano, apresentam facilidade na transferência de tecnologia para a produção industrial, podem crescer em meios de cultura constituídos de resíduos agroindustriais aquosos. Por sua rápida multiplicação celular, se torna atraente na utilização biotecnológica (GÖRS *et al.*, 2009).

O mercado mundial expandiu oferecendo diversos produtos de algas em uma ampla variedade de aplicações. Contudo, a utilização de microalgas entrou no mercado só depois no final do século passado, quando a tecnologia de cultivo e coleta deste organismo unicelular foi desenvolvida.

Quatro espécies de microrganismos fotossintetizantes (*Arthrospira*, *Chlorella*, *Dunaliella* e *Nannochloropsis*) atingiram o nível de produção em cultivo industrial utilizando estrutura de tanques a

céu aberto, enquanto o cultivo de algumas espécies unicelulares foi escalonado com sucesso em sistema utilizando biorreatores fechados (BEN-AMOTZ, 2009). Possíveis vantagens da utilização de algas na biotecnologia incluem a sua capacidade de: sintetizar e acumular grandes quantidades de lipídio neutro/óleo (20-50% do peso seco), elevadas taxas de crescimento (por exemplo, duplica de 1-3 vezes por dia), tolerância à regiões que não são adequadas para a agricultura convencional (por exemplo, solos do deserto, árido e semiárido), utilização dos nutrientes para o crescimento, como nitrogênio por exemplo, a partir de uma variedade de fontes de águas residuais, proporcionando assim o benefício adicional de biorremediação; remoção do dióxido de carbono de gases emitidos de combustíveis fósseis de usinas termoelétricas e outras fontes, contribuindo para a redução das emissões de gás no efeito estufa; produção de co-produtos e/ou subprodutos de alto valor agregado (biopolímeros, proteínas, polissacarídeos, pigmentos, ração animal, fertilizante e H₂), crescimento durante todo o ano com uma produtividade cerca de dez vezes maior que vegetais superiores (HU *et al.*, 2008). A principal vantagem do cultivo comercial das microalgas é a obtenção de seus metabólitos, que são utilizados na alimentação de organismos aquáticos e terrestres, como suplementos alimentares para os seres humanos, ou para seu uso em processos ambientais, como tratamento de águas residuais, fertilização dos solos, biocombustíveis e fitorremediação de resíduos tóxicos (PEREZ-GARCIA *et al.*, 2011).

As microalgas podem ser uma fonte alternativa de substâncias bioativas por apresentarem uma ampla diversidade bioquímica. Contém em sua composição proteínas, carotenóides, alguns imunoes-timuladores, polissacarídeos, vitaminas e minerais (MASOJÍDEK, *et al* 2010).

A extração de moléculas bioativas a partir de microalgas tem sido estudada por apresentarem vantagens em relação aos outros organismos como: são fáceis de serem cultivadas e necessitam de substratos de baixo valor comercial como CO₂, intensidade luminosa e sais minerais em meio aquoso. Microalgas são fontes promissoras de diversos compostos de alto valor agregado na área farmacêutica, alimentícia e cosmética.

Microrganismos fotossintetizantes podem ser uma alternativa como fonte de diferentes lectinas para aplicações comerciais, pois exibem estrutura e características únicas, como mostrado em extratos de *Chlorella vulgaris* (TANAKA *et al.*, 1998, CHU, 2006), *Anabaena flosaquae* (CARMICHAEL & BENT, 1981), *Microcystis aeruginosa*, *M. viridis* e *Oscillatoria agardhii* (SAKAMOTO *et al.*, 1996; YAMAGUCHI *et al.*, 1998; YAMAGUCHI *et al.*, 1999; SATO *et al.*, 2000). Embora o cultivo de microrganismos fotossintetizantes seja bem descrito na literatura, poucos estudos têm sido realizados em relação a extração, purificação e caracterização de lectinas provenientes desse microrganismos e os dados existentes ainda são considerados insuficientes sobre suas propriedades *in vitro* e suas possíveis funções *in vivo*.

Estudos sobre os compostos bioativos de microalgas (KIM & WIJESEKARA, 2010, SCHOLZ & LIEBEZEIT, 2012) também têm demonstrado efeito antitumoral, propriedades quimiopreventivas (WANG, *et al.* 2010), atividade anti-inflamatória (GUZMÁN; GATO; CALEJJA, 2001) e atividade antimicrobiana (KATHARIOS *et al.*, 2005, PARISI *et al.*, 2009). Pesquisas com a biomassa de *Chlorella vulgaris* demonstraram a produção de metabolitos secundários, que se comportam como antibióticos contra bactérias gram-positivas e gram-negativas e antifúngicas (CHA *et al.*, 2010, PLAZA, *et al.* 2012). Além das atividades descritas anteriormente, as microalgas apresentam potencial atividade antioxidante (PLAZA; CIFUENTES; IBANES, 2008; GAO & TAM,

2011). Os antioxidantes são comumente usados para inibir, prevenir ou retardar a deterioração por oxidação, podendo atuar na redução dos radicais livres (antioxidante primário) ou por um mecanismo que não envolve a redução direta dos radicais livres (antioxidante secundário). Os compostos fenólicos são encontrados em extratos de microalgas de diferentes grupos (SCHOLZ & LIEBEZEIT, 2012) e são importantes no metabolismo das plantas, tendo se tornado importantes para a saúde dos humanos devido as suas características, particularmente relacionadas às suas propriedades antioxidantes (VENDRAMINI, 2004, CHA *et al.*, 2010) e farmacológicas, como atividades antivirais e antimicrobianos (ABD EL-BAKY *et al.*, 2008). O crescente número de publicações representa a diversidade de substâncias presentes nas microalgas e suas respectivas atividades biológicas, gerando resultados científicos que permitem o avanço na geração de novos produtos a partir dos compostos bioativos identificados e suas possíveis aplicações. Vários setores da indústria estão acompanhando as descobertas científicas e a possível tendência de consumo destes compostos naturais, o que intensifica a busca por novos ingredientes para incorporar aos produtos já existentes, bem como no desenvolvimento de novos. Uma tendência que está se destacando é o aumento na procura por parte da população de alimentos e outros funcionais baseados em compostos bioativos derivados de fitoterápicos (ROCHA FILHO, 1995).

As microalgas podem ser adicionadas aos alimentos ou terem seus compostos isolados dos extratos utilizados. Quando sob a forma de extratos, os compostos presentes dependem, majoritariamente, do método de extração e do solvente utilizado (MARIUTTI & BRAGAGNOLO, 2007). Diversos solventes têm sido utilizados e comparados para extração de pigmentos e compostos em microalgas (WRIGHT *et al.*, 1997, SILVEIRA *et al.*, 2006, MORAES *et al.*, 2010). De modo similar ao que ocorre em outros organismos, cada classe

de microalgas apresenta sua própria combinação de pigmentos e coloração característica. Os principais grupos de pigmentos são as clorofilas, os carotenoides e as ficobilinas (ficobiliproteínas) (ABALDE *et al.*, 1998). O composto presente no extrato da microalga *Chlorella* de maior importância é β -1,3- glucana, um imunostimulador que sequestra radicais livres, além de reduzir o teor de lipídios no sangue. No entanto, vários outros efeitos promovendo melhorias na saúde já foram observados (eficácia no tratamento de úlceras gástricas, feridas, e prisão de ventre; ação preventiva contra a aterosclerose e hipercolesterolemia e ação antitumoral (YAMAGUCHI, 1997).

Além desses compostos, proteínas de grande valia biológica podem ser encontradas na biomassa de microalgas. Até o momento, a literatura apresenta poucos dados acerca da presença de lectinas, glicoproteínas com diversa gama de atuação em organismos vivos, sendo caracterizadas apenas como “hemaglutininas” em um dos poucos relatos da existência dessa macromolécula em *Chlorella pyrenoidosa* (CHU *et al.*, 2007).

2.3. Lectinas e atividade larvívica

O potencial inseticida de lectinas tem sido descrita contra estágios de desenvolvimento e formas maduras de insetos das Ordens Coleoptera, Diptera, Hemiptera, Homoptera, Hymenoptera, Isoptera, Lepidoptera e Neuroptera (PAIVA *et al.*, 2011). Os mecanismos pelos quais as lectinas exercem seus efeitos inseticidas são pouco conhecidos e têm ganhado interesse nos últimos anos. Lectinas entomotóxicas são geralmente resistentes à degradação proteolítica no trato digestivo de insetos (OLIVEIRA *et al.*, 2011). A ligação de lectinas a moléculas glicosiladas do trato intestinal dos insetos pode interferir nas funções de enzimas digestivas e proteínas assimilatórias, inibindo a digestão e absorção de nutrientes (COELHO *et al.*, 2007).

Quando ingeridas, as lectinas podem interferir nas atividades enzimáticas por: (1) ligação à porção glicídica de enzimas glicosiladas; (2) ligação às enzimas através de sítios diferentes do sítio de ligação ao substrato; (3) ligação ao substrato; (4) ligação tanto à enzima quanto ao substrato, aumentando a afinidade entre eles (MACEDO *et al.*, 2007).

A matriz peritrófica constitui uma membrana encontrada no intestino médio de insetos, exceto os das ordens Hemiptera e Homoptera (BANDYOPADHYAY *et al.*, 2001; DAMASCENO-SÁ & SILVA, 2007), que separa o conteúdo do lúmen intestinal das células epiteliais digestivas. A matriz contém uma rede composta por quitina (polímero de N-acetil-glicosamina) e glicoproteínas, como as peritrofinas (TELLAM *et al.*, 1999). Sua integridade é importante, pois a matriz peritrófica compartimentaliza os processos digestivos, bem como atua na proteção contra infecções por microrganismos e danos mecânicos provocados por partículas alimentares abrasivas (HEGEDUS *et al.*, 2009). Lectinas de plantas com afinidade por N-acetil-glicosamina e propriedade de ligação à quitina são inseticidas para muitos insetos por se ligarem à quitina e proteínas glicosiladas da matriz peritrófica, interferindo nos processos de digestão e absorção de nutrientes (PEUMANS & VAN DAMME, 1995; ZHU-SALZMAN & SALZMAN, 2001; CARLINI & GROSSI-DE-SÁ, 2002; MACEDO *et al.*, 2004; MACEDO *et al.*, 2007).

Estudos ultraestruturais mostraram anormalidades na formação da matriz peritrófica de insetos alimentados com a lectina ligadora de quitina de *Triticum vulgare* (WGA), tais como a hipersecreção de muitas camadas desorganizadas em larvas de *Ostriniana bilalis* e alterações morfológicas nas microvilosidades de larvas de *Drosophila* (HARPER *et al.*, 1998; LI *et al.*, 2009; VANDENBORRE *et al.*, 2011). Lectina das sementes de *Canavalia ensiformis* (Con A) promoveu redução da permeabilidade da matriz peritrófica, assim como restrição

no movimento de nutrientes e enzimas digestivas através dos poros da membrana peritrófica (EISEMANN *et al.*, 1994)

Lectinas podem cruzar a barreira epitelial por transcitose e entrar no sistema circulatório do inseto, interferindo com moléculas de autodefesa presentes na hemolinfa (FITCHES *et al.*, 2001). Lectinas podem também ser internalizadas em vesículas nas células epiteliais por endocitose e bloquear a proliferação celular (YU *et al.*, 1999). Até então, a atividade larvicida de lectinas de plantas tem sido elucidada com dados bastante significativos, porém, ainda não haviam relatos similares com relação ao extrato bruto e a lectinas de microalgas, o que abre um novo campo de estudo tanto no isolamento dessas proteínas, quanto na atividade biológica frente a insetos. Em 2021, foi publicado um trabalho na Algal Research reportando o primeiro caso de lectina extraída de microrganismos fotossintetizantes com atividade larvicida frente a *Aedes aegypti* (CAVALCANTI *et al.*, 2021). Os dados mostram que a mortalidade larval foi observada a cada 3h durante 72h. A lectina de *Chlorella vulgaris* (CvL) obteve atividade hemaglutinante de 185,130 AH/mg, peso molecular de 17 KDa, fator de purificação foi menor que 1 e rendimento de 0,33%. A lectina reconheceu os carboidratos D-frutose, D-galactose, D-glicose, D-lactose, D-xilose, D-maltose, D-raftose, N-acetil-D-glicosamina, D-arabinose e as glicoproteínas albumina e azocaseína. CvL foi estável nos pHs de 3,5 a 10, bem como manteve sua atividade até 60 °C. Os íons divalentes CaCl_2 , KCl , NaCl , ZnCl_2 , Zn_2SO_4 , MgSO_4 e CuSO_4 diminuíram a atividade hemaglutinante para até 16 UH. O extrato bruto (EB) e a lectina de *Chlorella vulgaris* apresentaram atividade larvicida contra as larvas de *Aedes aegypti* testadas. O valor da CL50 foi de aproximadamente 50,8 µg/ml para o extrato bruto e de 118,4 µg/ml para a lectina após 72h e 24h de exposição, respectivamente, sendo o extrato bruto o melhor método de ação contra as larvas de *Aedes aegypti*. Foram feitos ensaios larvicidas

com a lectina inibida por frutose e glicose, bem como por azocaseína, que demonstraram uma total inibição da atividade larvicida sem a presença desses compostos, indicando que a atividade larvicida foi realmente caracterizada pela lectina de *Chlorella vulgaris*. Ensaios de inibição a tripsina foram realizados com o extrato de larvas tratadas com o EB, a CVL, e a CVL inibida pelos carboidratos e glicoproteína acima mencionados. Os resultados mostraram que tanto o EB quanto a CVL foram capazes de inibir tripsina, sendo este então o mecanismo de ação da atividade larvicida relatada neste estudo. Diante do exposto, é possível concluir que a biomassa de *Chlorella vulgaris* possui agentes larvicidas biodegradáveis, que atuam com baixas concentrações e possuem grande eficácia, sendo uma nova alternativa no controle das larvas de *Aedes aegypti*.

3. CONCLUSÃO

A utilização de lectinas de microalgas pode representar um avanço significativo no controle das arboviroses transmitidas pelo *Aedes aegypti*, contribuindo para a melhoria da saúde pública e a preservação do meio ambiente. Essa abordagem eco-friendly pode desempenhar um papel crucial na redução das taxas de transmissão dessas doenças e, assim, beneficiar a qualidade de vida das populações afetadas em todo o mundo.

4. REFERÊNCIAS

ADDOR, R.W. Insecticides. In: **GODFERY, C.R.A.** (ed.). *Agrochemicals from natural products*. New York: Marcel Dekker Inc., pp. 1-62. 1994.

AIUB, C.A.F. *et al.* Genotoxic evaluation of the organophosphorous pesticide temephos. **Genetic and Molecular Research**, v. 1, p. 159-166, 2002.

BANDYOPADHYAY, S.; ROY, A.; DAS, S. Binding of garlic (*Allium sativum*) leaf lectin to the gut receptors of homopteran pests is correlated to its insecticidal activity. **Plant Science**, v. 161, p. 1025-1033, 2001.

BRAGA, I.A.; VALLE, D. *Aedes aegypti*: surveillance, resistance monitoring, and control alternatives in Brazil. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, v. 16, p. 295-302, 2007.

CARLINI, C.R., GROSSI-DE-SÁ, M.F. Plant toxic proteins with insecticidal properties. A review on their potential as bioinsecticides. **Toxicon**, v. 40, p. 1515-1539, 2002.

CAVALCANTI, V.L.R *et al.* *Chlorella vulgaris* lectin kills *Aedes aegypti* larvae. **Algal Research**, v 56, p 102290, ISSN 2211-9264, 2021.

CARVALHO, M. S. L.; CALDAS, E. D.; DEGALLIER, N.; VILARINHOS, P. T. R.; SOUZA, L. C. K. R.; YOSHIZAWA, M. A. C.; KNOX, M. B.; OLIVEIRA, C. Suscetibilidade de larvas de *Aedes aegypti* ao inseticida temefós no Distrito Federal. **Revista Saúde Pública**, v.38, p. 623-629. 2004.

CHA, K. H.; KANG, S. W.; KIM, C. Y. *et al.* Effect of pressurized liquids on extraction of antioxidants from *Chlorella vulgaris*. **J. Agric. Food Chemistry**, v. 58, p. 4756-4761, 2010.

CHU, C-Y.; HUANG, R.; LING, P-L. Purification and characterization of a novel haemagglutinin from *Chlorella pyrenoidosa*. **J IndMicrobiol-Biotechnol**, 33:967-973, 2007.

COELHO, M.B.; MARANGONI, S.; MACEDO, M.L.R. Insecticidal action of *Annona coriacea* lectin against the flour moth *Anagastakuehniella* and the rice moth *Corcyra cephalonica* (Lepidoptera: Pyralidae). comparative biochemistry and physiology part C, **Toxicology and Pharmacology**, v. 146, p. 406-414, 2007.

CONSOLI, R.A.G.B.; OLIVEIRA, R.L. Principais mosquitos de importância sanitária no Brasil. Rio de Janeiro: **Fundação Oswaldo Cruz**, 1994.

DAMASCENO-SÁ, J.C.; SILVA, J.C. Evolução e aspectos do sistema digestório em Hemiptera. **Revista Trópica - Ciências Agrárias e Biológicas**, v. 1, p. 32-40, 2007.

EISEMANN, C.H. *et al.* Larvicidal activity of lectins on Luciliacuprina - mechanism of action. **Entomologia Experimentalis et Applicata**, v. 72, p. 1-10, 1994.

FITCHES, E.; GATEHOUSE, J.A. A comparison of the short and long term effects of insecticidal lectins on the activities of soluble and brush border enzymes of tomato moth larvae (*Lacanobiaoleracea*). **Journal of Insect Physiology**, v. 44, p. 1213-1224, 1998.

FITCHES, E. *et al.* *In vitro* and *in vivo* binding of snowdrop (*Galanthus nivalis* agglutinin; GNA) and jackbean (*Canavaliaensiformis*; Con A) lectins within tomato moth (*Lacanobiaoleracea*) larvae; mechanisms of insecticidal action. **Journal of Insect Physiology**, v. 47, n. 7, p. 777-787, 2001.

FITCHES, E. *et al.* An evaluation of garlic lectin as an alternative carrier domain for insecticidal fusion proteins. **Insect Science**, v. 15, p. 483-495, 2008.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. Guia de Vigilância Epidemiológica. **FUNASA**, Brasília, 2001.

GUBLER D. J. Epidemic dengue/dengue hemorrhagic fever as a public health, social and economic problem in the 21st century. **Trends Microbiol**, v.10, p. 100-3. 2002.

HARPER, M.S., HOPKINS, T.L., CZAPLA, T.H. Effect of wheat germ agglutinin on the formation and structure of the peritrophic membra-

ne in European corn borer (*Ostrinia nubilalis*) larvae. **Tissue and Cell**, v. 30, p. 166–176, 1998.

HEGEDUS, D.D. *et al.* Peritrophic matrix synthesis, architecture and function: new insights. **Annual Review of Entomology**, v. 54, p. 285–302, 2009.

HU, Q.; GUTERMAN, H.; RICHMOND, A. A flat inclined modular photobioreactor for outdoor mass cultivation of photoautotrophs. **Biotechnol. Bioeng.** v. 51, p. 51–60, 1996.

IMBERT, A. *et al.* Structures of the lectins from *Pseudomonas aeruginosa*: insights into the molecular basis for host glycan recognition. **Microbes and Infection**, v. 6, p. 221–228, 2004.

JIANG, Y.; YOSHIDA, T.; QUIGG, A. Photosynthetic performance, lipid production and biomass composition in response to nitrogen limitation in marine microalgae. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 54, p. 70–77, 2012.

KATHARIOS, P.; PAPADAKIS, I.E.; PRAPAS, A. *et al.* Mortality control of viral encephalopathy and retinopathy in 0+ grouper *Epinephelus marginatus* after prolonged bath in dense *Chlorella minutissima* culture. **Bull. Eur. Assoc. Fish Pathol.** v. 25, p. 28–31, 2005.

KAUR, M. *et al.* A tuber lectin from *Arisaema helleborifolium* Schott with anti-insect activity against melon fruit fly, *Bactrocera cucurbitae* (Coquillett) and anti-cancer effect on human cancer cell. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, v. 445, p. 156–165, 2006.

KIM, S. K.; WIJESEKARA, I. Development and biological activities of marine-derived bioactive peptides: A review. **Journal of Functional foods**, v. 2, p. 1–9, 2010.

LUNA, J. E. D., MARTINS, M. F., ANJOS, A. F., KUWABARA, E. F., NAVARRO-SILVA, M.A. Suscetibilidade de *Aedes aegypti* aos inseti-

cidas temefós e cipermetrina, Brasil. **Revista Saúde Pública**, v.38, p. 842-843. 2004.

L.L. JUAN, V.G. RECIO, P.J. LÓPEZ, T.G. JUAN, M. CORDOBA-DIAZ, D. CORDOBA-DIAZ, Pharmaceutical applications of lectins, **J. Drug Deliv. Sci. Technol.** 42, 126-133. 2017.

LEITE, E.J. State-of-knowledge on Myracrodruonurundeuva Fr. Allemão (Anacardiaceae) for genetic conservation in Brazil. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, v. 5, p. 193-206, 2002.

LEITE, M.I.S. *et al.* Ação residual de inseticidas para larvas e adultos do predador *Cyclonedasanguinea* (Linnaeu, 1763) (Coleoptera: Coccinellidae). **Arquivos do Instituto Biológico**, v. 74, p. 251-258, 2007.

LI, H.M. *et al.* Transcriptional signatures in response to wheat germ agglutinin and starvation in *Drosophila melanogaster* larval midgut. **Insect Molecular Biology**, v. 18, p. 21-31, 2009.

MACEDO, M.L.R. *et al.* Purification and characterization of an N-acetylglucosamine-binding lectin from *Koelreuteriapaniculata* seeds and its effect on the larval development of *Callosobruchusmaculatus* (Coleoptera: Bruchidae) and *Anagastakuehniella* (Lepidoptera: Pyralidae). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 51, p. 2980-2986, 2003.

MACEDO, M.L.R. *et al.* Mechanisms of the insecticidal action of TEL (*Talisia esculenta* lectin) against *Callosobruchusmaculatus* (Coleoptera: Bruchidae). **Archives of Insect Biochemistry and Physiology**, v. 56, p. 84-96, 2004.

MACEDO, M.L.R. *et al.* Insecticidal action of *Bauhinia monandra* leaf lectin (BmoLL) against *Anagastakuehniella* (Lepidoptera: Pyralidae), *Zabrotessubfasciatus* and *Callosobruchusmaculatus* (Coleoptera: Bruchidae). **Comparative Biochemistry and Physiology Part A, Molecular & Integrative Physiology**, v. 146, p. 486-498, 2007.

MELTZER, E., SCHWARTZ, E. A travel medicine view of dengue and dengue hemorrhagic fever. **Travel Medicine and Infectious Disease**, v. 7, p. 278-283, 2009.

MICHIELS, K. ; VAN DAMME, E.J.; SMAGGHE, G. Plant-insect interactions : What can we learn from plant lectins? **Archives of Insect Biochemistry and Physiology**, v. 73, p. 193- 212, 2010.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Boletim epidemiológico**. ISSN 2358-9450, volume 47, N° 8, 2016. Disponível em <http://www.combateaedes.saude.gov.br/images/pdf/2016-006-Dengue-SE5.pdf>.

MORAES, C. C.; BURKERT, J. F. M.; KALIL, S. J. C-phycoyanin extraction process for large-scale use. **Journal of Food Biochemistry**, v. 34, n. 1, p. 133-148, 2010.

MOURA, R.M. *et al.* CvL, a lectin from the marine sponge *Cliona varians*: Isolation, characterization and its effects on pathogenic bacteria and *Leishmania promastigotes*. **Comparative Biochemistry and Physiology Part A, Molecular & Integrative Physiology**, v. 145, p. 517-523, 2006.

NOGUEIRA, R. M., *et al.* Dengue in the state of Rio de Janeiro, Brazil, 1986-1998. **Mem Inst Oswaldo Cruz**, v.94, p. 297-304. 1999.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE. Dengue and dengue hemorrhagic fever. **Fact sheet n. 117**, 2009.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE - OMS. Doenças transmitidas por vetores. 2016. Disponível em <http://www.who.int/media-centre/factsheets/fs387/en/>.

PEREZ-GARCIA, O.; *et al.* Heterotrophic cultures of microalgae: metabolism and potencial products. **Water Research**, v. 45, p. 11-36, 2011.

PEUMANS, W.J., VAN DAMME, E.J.M. Lectins as plant defense proteins. **Plant Physiology**, v. 109, p. 347-352, 1995.

PULZ, O.; GROSS, W. Valuable products from biotechnology of microalgae. **Applied Microbiology and Biotechnology**. v. 65, p. 635 - 648, 2004.

RAVEN, P.H.; EVERT, R.F.; EICHHORN, S.E. **Biologia vegetal**. 6a ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2004.

ROCHA, B.A.M. Structural basis for both pro- and anti-inflammatory response induced by mannose-specific legume lectin from *Cymbosemmaroseum*. **Biochimie**, v. 93, p. 806-816, 2011.

ROCHA FILHO, P. A. Fitocosméticos. **Cosmetic & Toiletries**, v.7, n. 2, p. 18-20, 1995.

ROGERS D. J., HORI K. Marine algal lectins: new developments, **Hydrobiologia** v.260/261, p. 589-593. 1993.

SATO, Y. *et al.* High mannose-specific lectin (KAA-2) from the red alga *Kappaphycusalvarezii* potentially inhibits influenza virus infection in a strain-independent manner. **Biochemical and Biophysical Research Communications**, v. 405, p. 291-296, 2011.

SCHATZMAYR, H. G. Dengue situation in Brazil by year 2000. **Mem Inst Oswaldo Cruz**, v.1 p. 179-81. 2000.

SELL, A. M.; COSTA, C. P. Atividades biológicas das lectinas PHA, WGA, Jacalina e Artocarpina. **ActaScientiarum** v. 22(2), p. 297-303, 2000.

SHIOMI K., YAMANAKA H., KIKUCHI T. Purification and physicochemical properties of a hemagglutinin (GVA-1) in the red alga *Gracilaria verrucosa*, **Bull. J. Soc. Sci. Fish.** v.47, p. 1078-1084. 1981.

SILVA, M.C.C. Immobilized *Cratylia mollis* lectin: An affinity matrix to purify a soybean (*Glycine max*) seed protein with *in vitro* platelet antiaggregation and anticoagulant activities. **Process Biochemistry**, v. 46, p. 74-80, 2011.

SINGH, J.; GU, S. Commercialization potential of microalgae for bio-fuels production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 2596–2610, 2010.

SOUZA, J.D. *et al.* A new *Bauhinia monandra* galactose-specific lectin purified in milligram quantities from secondary roots with antifungal and termiticidal activities. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 65, p. 696-702, 2011.

TAUIL, P. L. Aspectos críticos do controle do dengue no Brasil. **Cad Saúde Pública**, v.18, p. 867-71. 2002.

VAN DAMME E.J., PEUMANS W.J., BARRE A., ROUGÉ P. Plant lectins: a composite of several distinct families of structurally and evolutionary related proteins with diverse biological roles, **Crit. Rev. Plant Sci.** v. 17, p. 645–662. 1998.

VANDAMME, D.; PONTES, C. S. V.; GOIRIS, K. *et al.* Evaluation of Electro-Coagulation–Flocculation for Harvesting Marine and Freshwater Microalgae. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 108, n. 10, p. 2320-2329, 2011.

VENDRAMINI, A. L. A.; TRUGO, L. C. Phenolic compounds in acerola fruit (*Malpighia punicifolia*, L.). **Journal Brazilian Chemistry Society**, v. 15, n. 5, p. 664-668, 2004.

VIEGAS JÚNIOR, C. Terpenos com atividade inseticida: uma alternativa para o controle químico de insetos. **Química Nova**, v.26, p. 390-400. 2003.

VIJAYAVEL, K.; ANBUSELVAM, C.; BALASUBRAMANIAN, M. P. Antioxidant effect of the marine algae *Chlorella vulgaris* against naphthalene-induced oxidative stress in the albino rats. **Molecular Cell Biochemistry**, v. 303, p. 39–44, 2007.

WANG, H.-M.; PAN, J.-L.; CHEN, C.-Y. *et al.* Identification of anti-lung cancer extract from *Chlorella vulgaris* C-C by antioxidant proper-

ty using supercritical carbon dioxide extraction. **Process Biochemistry**, v. 45, p. 1865-1872, 2010.

WANG, H.X. *et al.* Hypotensive and vasorelaxing activities of a lectin from the edible mushroom *Tricholomamongolicum*. **Pharmacology & Toxicology**, v. 79, n. 6, p. 318-323, 1996.

WILSON, K. E; HUNER, N. P A. The role of growth rate, redox-state of the plastoquinone pool and the trans-thylakoid Delta pH in photoacclimation of *Chlorella vulgaris* to growth irradiance and temperature. **Planta**, v. 212, p. 93-102, 2000.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. Dengue haemorrhagic fever: diagnosis, treatment, prevention and control. 2nd ed. Geneva, 1997.

YAMAGUCHI, K. Recent advances in microalgal bioscience in Japan, with special reference to utilization of biomass and metabolites: a review. **J. Appl. Phycol.**, v. 8, p. 487-502, 1997.

YU, L.G. *et al.* Edible mushroom (*Agaricusbisporus*) lectin, which reversibly inhibits epithelial cell proliferation, blocks nuclear localization sequence-dependent nuclear protein import. **The Journal of Biological Chemistry**, v. 274, p. 4890-4899, 1999.

ZHU-SALZMAN, K., SALZMAN, R.A. Functional mechanics of the plant defensive *Griffoniasimplicifolia* lectin II: resistance to proteolysis is independent of glycoconjugate binding in the insect gut. **Journal of Economic Entomology**, v. 94, p. 1280-1284, 2001.

CAPÍTULO 4

BIOPROSPECÇÃO DE MICRORGANISMOS A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS AGROINDUSTRIAIS

Nilson Fernando Barbosa da Silva¹

Juanize Matias da Silva Batista²

Maria Clara do Nascimento³

Anna Gabrielly Duarte Neves⁴

Raphael Luiz Andrade Silva⁵

Romero Marcos Pedrosa Brandão Costa⁶

Ana Lúcia Figueiredo Porto⁷

DOI: 10.46898/rfb.9786558895886.4

1 Centro de ciências farmacêuticas - Universidade Católica de Pernambuco.

2 Departamento de Morfologia e Fisiologia Animal - Universidade Federal Rural de Pernambuco.

3 Departamento de Morfologia e Fisiologia Animal - Universidade Federal Rural de Pernambuco.

4 Departamento de Morfologia e Fisiologia Animal - Universidade Federal Rural de Pernambuco.

5 Departamento de Morfologia e Fisiologia Animal - Universidade Federal Rural de Pernambuco.

6 Departamento de Morfologia e Fisiologia Animal - Universidade Federal Rural de Pernambuco.

7 Departamento de Morfologia e Fisiologia Animal - Universidade Federal Rural de Pernambuco.

RESUMO

A agropecuária é atualmente um dos principais motores de desenvolvimento no âmbito econômico do Brasil. A produção agroindustrial envolve diversas etapas, seja o produto final oriundo das lavouras (agrário) ou de origem animal (pecuário) e uma dessas etapas consiste na separação do produto de interesse comercial do material bruto total. Neste processamento para obtenção de um produto gera-se os resíduos, componentes do material bruto que não possuem interesse comercial e, portanto, não possuem valor agregado. Apesar de considerados como resíduos por parte da grande indústria, esses subprodutos são ricos em diversos compostos biológicos com funcionalidade nutracêutica, cosmecêutica, cosmética, farmacológica, conservante e protetiva como ácidos orgânicos, minerais, lipídios, enzimas, vitaminas, fibras e polímeros naturais que podem ser utilizados direta ou indiretamente por diferentes setores industriais. Uma das formas de se obter essas moléculas dos resíduos é a partir da bioprospecção microbiana. A atividade de bioprospecção microbiana a partir desses resíduos é responsável pela produção de diversos coprodutos de interesse comercial bem como pela redução desses resíduos.

Palavras-chave: Fungo, Bactéria, Microalga, Agrícola, Fermentação.

1. INTRODUÇÃO

A agropecuária é atualmente um dos principais motores de desenvolvimento no âmbito econômico do Brasil. Segundo dados do Ministério da Agricultura e Pecuária, o Brasil encerrou o ano de 2022 com um valor bruto de produção agropecuária (VPB) de 1,189 trilhão de reais, sendo 814,77 bilhões equivalentes à produção da agricultura e 374,27 bilhões equivalentes à produção da pecuária. Os três maiores

produtos finais da agricultura, ainda segundo a mesma fonte, no ano de 2022 foram: Soja, Milho e Cana de açúcar, com valores brutos de produção em bilhões de reais contabilizando cerca de 334, 97 e 90 bilhões de reais, respectivamente. Já na Pecuária, a carne bovina foi o produto de principal importância, com um valor bruto de 151 bilhões de reais, seguida do frango de corte e do leite com 112 e 58 bilhões de reais, respectivamente. A produção agroindustrial envolve diversas etapas, seja o produto final oriundo das lavouras (agrário) ou de origem animal (pecuário) e uma dessas etapas consiste na separação do produto de interesse comercial do material bruto total. Neste processamento para obtenção de um produto gera-se os resíduos, componentes do material bruto que não possuem interesse comercial e, portanto, não possuem valor agregado, sendo geralmente descartados quando a Política Nacional de Resíduos Sólidos não garante alternativas de reaproveitamento ou de logística reversa (TELLES, 2022). Essa geração de resíduos sólidos orgânicos em massa é causa parcial de muitas das problemáticas que envolvem a dificuldade de se ter um desenvolvimento sustentável a nível nacional, assim, o desenvolvimento de novas tecnologias para dar funcionalidade a esses resíduos pode contribuir para a execução dos objetivos de desenvolvimento sustentável no Brasil, estabelecido pela ONU em 2016 através do decreto número 8.892/2016

O Sistema Nacional de Informações sobre a gestão dos Resíduos sólidos (SINIR) é um banco de dados associado ao ministério do meio ambiente que visa a organização de informações quantitativas referentes à produção de diversos tipos de resíduos sólidos, entretanto, além de estar desatualizado desde 2020, não possui dados referentes a produção de resíduos sólidos por parte da agroindústria, o que torna difícil a mensuração da quantidade gerado por este importante setor. Apesar da ausência de informações confiáveis a

respeito da quantidade de resíduos gerados pela agroindústria, sabe-se que este grande setor é responsável pela geração de diversos tipos desses resíduos, desde cascas de frutas, sementes, folhas, bagaços na agricultura à pele, penas, pelos, ossos, vísceras, e outros tecidos na pecuária. Esses resíduos quando descartados de forma indiscriminada podem acarretar problemas ambientais de médio à longo prazo, além possibilitarem o surgimento de patógenos e patologias danosas a saúde humana e animal, como já constatados em estudos recentes (MARTINS *et al.*, 2023; BARROS *et al.*, 2023). Apesar de considerados como resíduos por parte da grande indústria, esses subprodutos são ricos em diversos compostos biológicos com funcionalidade nutracêutica, cosmecêutica, cosmética, farmacológica, conservante e protetiva como ácidos orgânicos, minerais, lipídios, enzimas, vitaminas, fibras e polímeros naturais que podem ser utilizados direta ou indiretamente por diferentes setores industriais (GOPALIYA *et al.*, 2023; FELIPE *et al.*, 2023).

Define-se como bioprospecção o processo de utilização de compostos orgânicos ou suas informações químicas, físicas, biológicas e/ou genéticas para obtenção de um produto de interesse comercial. A bioprospecção é amplamente empregada em diversas áreas da biotecnologia como a indústria farmacêutica, agrícola, bioquímica e alimentar, tendo sido principal responsável por muitas das novas aquisições biotecnológicas como fármacos, polímeros, excipientes, pigmentos naturais, enzimas, além de outros mais. Uma das formas de bioprospecção é a partir de microrganismos. Microrganismos são organismos minúsculos com alto potencial de produção de diferentes tipos de metabólitos secundários, muitos desses com forte potencial bioativo (RANI *et al.*, 2023). Essa capacidade de produção propicia a sua condição adaptativa, que permite que esses organismos sejam capazes de se distribuírem ao longo de todo globo, desde regiões

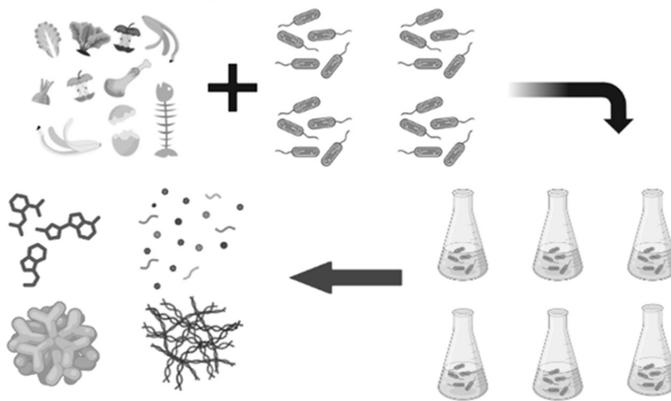
tropicais a temperadas, ambientes de pH ácido ou com alta basicidade além da capacidade de colonizar diferentes tipos de substratos. A interação entre microrganismos e resíduos sólidos orgânicos agroindustriais podem corroborar para a produção diversos dos metabólitos de interesse comercial, o que faz com que esses microrganismos sejam considerados como formas alternativas de tratamento residual. Assim, este trabalho tem como intuito relatar utilizando evidências científicas a capacidade de bioprospecção de microrganismos a partir de resíduos sólidos orgânicos agroindustriais (GICANA *et al.*, 2022).

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Processo de bioprospecção de resíduos por microrganismos

A bioprospecção consiste na percepção de micro, macromoléculas bioativas ou suas informações químicas, físicas, biológicas e/ou genéticas como um produto de potencial a ser explorado. A bioprospecção de microrganismos a partir de resíduos pode acontecer de diversas formas, desde uma interação entre eles onde os resíduos servem como substrato para produção de enzimas, pigmentos naturais, nanopartículas, biopolímeros até a interação onde o produto final é um composto proteico, lipídico ou um mineral resultante da hidrólise do substrato (VETHATHIRRI *et al.*, 2023). Essa interação decorre da capacidade dos microrganismos se distribuírem em uma ampla gama de condições, usando os mais variados tipos de substratos como nutrientes e a partir deles produzirem compostos bioativos de interesse comercial como bem exemplifica a figura 1.

Figura 1. Processo de bioprospecção de microrganismos a partir de resíduos orgânicos. Onde podemos ver o ciclo de aproveitamento de resíduos para fermentação e obtenção de biomoléculas.



Fonte: os autores (2023)

Por exemplo, Felipe *et al.*, (2023) em seu estudo envolvendo fungos do gênero *Aspergillus* na presença de substratos contendo glicose e extratos de leveduras constatou a capacidade deste microrganismo produzir ácido kójico, um dos ácidos mais utilizados no tratamento de manchas escuras na pele enquanto Gopaliya *et al.*, (2023) em seu trabalho de análise *in vitro* constatou a capacidade de espécies desse mesmo gênero de fungos quando colocadas em um substrato de resíduos de casca de mandioca, produzirem ácido L-málico, um aminoácido não essencial com capacidade de combater a fadiga muscular. Essa ampla gama de metabólitos secundários provenientes dos microrganismos é o que torna a atividade de bioprospecção algo vantajoso para diferentes setores da grande indústria e o que vem sendo responsável por boa parte do suprimento de compostos inovadores na biotecnologia, Visto que as substâncias bioativas dos fungos são derivadas do metabolismo secundário, por meio do qual são gerados compostos de baixo peso molecular pertencentes a diversas classes químicas, como, policetídeos, alcalóides, terpenos e peptídeos não ribossomais..

2.2. Bioprospecção de resíduos da soja

O processamento da soja envolve a extração da sua semente para produção de um extrato aquoso do qual se derivará diversos tipos de produtos como óleos, bebidas e alimentos. Os subprodutos do processamento da soja consistem em palhas, vagens, flores, folhas, raízes e cascas, correspondendo a cerca de 73% do total da soja produzida. O Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) vinculado ao governo federal, não dispõe de informações atuais sobre a quantificação de resíduos gerados durante a colheita e processamento da soja, entretanto, em seu relatório intitulado: Diagnóstico dos resíduos orgânicos do setor agrossilvopastoril e agroindustriais associadas publicado em 2012, analistas de dados estimaram uma produção total residual de mais de 41 milhões de toneladas em todo o território brasileiro, um número exorbitante e quase 3 vezes maior do que o total produzido para consumo. O processo de bioprospecção de microrganismos utilizando resíduos da soja na maioria das vezes envolve o alto teor de amido presente na composição química desses subprodutos. Vethathirri et al., (2023) em seu estudo com efluentes de empresas de processamento de soja, criou biorreatores com águas residuais dessas empresas e constatou que essas águas residuais contendo subprodutos de soja são favoráveis para o crescimento de espécies de microrganismos considerados como proteínas de única célula (SCP). Dentre os microrganismos produzidos nesses biorreatores, os mais predominantes foram os dos gêneros *Azospirillum*, *Rhodobacter*, *Lactococcus* e *Novosphingobium*. O termo “proteína de única célula” compreende biomassas de microrganismos que podem ser utilizadas na formulação de suplementos para alimentação humana e animal, e como evidenciado na pesquisa realizada por Vethathirri *et al.*, (2023) essas biomassas quando produzidas a partir dos resíduos da soja possuem um rendimento de 0,53 a 3,13 g proteína/g, um rendimento

que em larga escala pode suprir necessidades alimentares de diversos setores. Um outro estudo desenvolvido por Bellardo *et al.*, (2016) utilizaram resíduos de fibra de soja como nutriente para fermentação em estado sólido de *Bacillus thuringiensis* para sua utilização como biopesticida na correção de solos. A ação biopesticida de *B. thuringiensis* parte da sua capacidade de produzir uma proteína do tipo cristal paraesporal chamada de d-endotoxina. Como resultado, os pesquisadores envolvidos determinam um alto teor de d-endotoxina por parte da *B. thuringiensis* fermentada com resíduos de fibra de soja, afirmando então por meio desses resultados a eficiência desses resíduos na produção da espécie e de seus metabólitos bem como sua aplicabilidade e importância. Outros estudos têm sido realizados em diferentes áreas de pesquisa envolvendo a bioprospecção de microrganismos em resíduos do processamento da soja ao longo dos últimos anos, com resultados bastante satisfatórios. A tabela 1 apresenta um agrupamento resumido de alguns desses estudos bem como os microrganismos utilizados, a forma de fermentação, os resultados obtidos e a aplicabilidade desses resultados.

Diferentes tipos de microrganismos podem dar diferentes tipos de utilidades aos subprodutos do processamento da soja, outrora usados apenas como aditivos nutricionais na formulação de ração animal. Nesse contexto, há uma necessidade de se continuar empregando novos esforços techno-científicos para a aquisição de novos co-produtos, uma vez que o potencial de produção deste tipo de bioprospecção ainda não foi totalmente evidenciado.

Tabela 1. Estudos referentes a bioprospecção de microrganismos utilizando resíduos de processamento da soja

Organismo	Nome científico	Meio de cultivo	Resultados obtidos	Aplicação	Autor
Fungo	<i>C. echinulata</i>	Processo de duas etapas	Adesão a leveduras de 95,24%	Produção de lipídios microbianos	QIYAO <i>et al.</i> , (2022)
Bactéria	<i>L. plantarum</i>	Fermentação em estado líquido	Efetividade da hidrólise enzimática dos resíduos	Produção de peptídeos bioativos	WANG <i>et al.</i> , (2022)
Bactéria	<i>G. xylinus</i> e <i>B. pumilus</i>	Fermentação em estado sólido	Resíduos como fonte potencial de nitrogênio, atividade proteásica de 170 U/mL	Produção de nanocelulose	TAOKAE W <i>et al.</i> , (2022)
Fungo	<i>S. cerevisiae</i> e <i>Hansenula sp.</i>	Fermentação em estado sólido	Aumento de teor de fenóis fibras e na composição centesimal dos resíduos	Produção de bebida fermentada	SHI <i>et al.</i> , (2020)
Fungo	<i>G. lucidum</i> e <i>L. edodes</i>	Fermentação em estado sólido	Atividade antioxidante e antiosteoporose	Tratamento de osteoporose pós menopausa	YANG <i>et al.</i> , (2020)
Fungo	<i>B. licheniformis</i>	Fermentação em estado sólido	Produção de 185.99 mg/g de peptídeos e 910.12 U/g de queratinases	Produção de hidrolisados	TULY <i>et al.</i> , (2022)

Fonte: Os autores (2023).

2.3. Bioprospecção de resíduos da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar por muito tempo foi considerada como um tesouro para os produtores brasileiros. O Nordeste brasileiro, que outrora fora conhecido por suas florestas tropicais de extensas altitudes, teve praticamente todo seu bioma alterado devido à introdução dessas culturas de cana-de-açúcar. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2021 o Brasil totalizou uma área superior a 9 milhões de hectares destinada à colheita da cana-de-açúcar, o que equivale a um valor de produção de cerca de 715

milhões de toneladas. Os principais produtos do processamento da cana-de-açúcar são o açúcar e o etanol, como denotado na imagem 2. Soma-se aos seus resíduos o bagaço, vinhaça, a torta de filtro e a cinza do bagaço, nos casos da queima da cana, estes equivalente a um valor entre 360 e 760 kg para cada tonelada de cana produzida (SPADOTTO; RIBEIRO, 2006).

Figura 2. Processamento da cana-de-açúcar



Fonte: Os autores (2023)

Os resíduos da cana-de-açúcar já foram alvos de diversos estudos visando sua conversão para um coproduto de interesse comercial desde a produção de compostos nutricionais para formulação de ração animal, a biofertilizante e até mesmo para a produção de fontes de energia alternativas como biogás e biohidrogênio. Referente a bioprospecção de microrganismos, Eng *et al.*, (2022) em seu estudo sobre produção de ácidos graxos voláteis (VFA) utilizando fermentação escura com vinhaça de cana-de-açúcar constatou que microrganismos da família *Clostridiaceae*, *Enterobacteriaceae* e *Lachnospiraceae* e ordem *Veillonellales-Selenomonadales* estão presentes durante os maiores picos de produção desses VFA, enquanto os microrganismos das famílias *Desulfotomaculales* e *Lactobacillaceae* estavam mais

associadas ao consumo dos VFA e produção de ácido lático. Esses resultados contribuem para uma noção mais exata da interação entre os microrganismos e os resíduos da cana-de-açúcar, abrindo espaço para um possível novo coproduto a ser desenvolvido a partir desses subprodutos. Gicana *et al.*, (2022) utilizando resíduos da piscicultura e bagaços de cana, conseguiram cultivar *Bacillus megaterium* para produção de alcalases recombinantes. Nesse estudo, os resíduos da cana serviram para uma superexpressão das alcalases, o que permitiu a Gicana *et al.*, (2022) conseguirem um rendimento máximo de 2,5g por kg de resíduos. Outros estudos como o realizado por Siripurapu *et al.*, (2022) também corroboraram para a bioprospecção de microrganismos em resíduos dessa planta comercial. Os autores desse estudo conseguiram produzir Polihidroxibutirato, um polímero verde biodegradável a partir da fermentação de *Klebsiella pneumoniae* G1 isoladas de solos marinhos em resíduos do bagaço da cana.

As aplicações de microrganismo envolvendo resíduos da cana-de-açúcar são imensas, os processos são geralmente curtos e o custo é mínimo quando comparado aos métodos atuais para descarte desses resíduos, o que mais uma vez corrobora com a necessidade de se abrir espaço para a utilização dessas micro espécies nesses setores.

2.4. Bioprospecção de resíduos da avicultura

A avicultura também é um forte setor agroindustrial a nível nacional. A indústria avícola é um dos maiores motores econômicos do Brasil atualmente. Segundo o relatório anual de 2022 da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), o Brasil totalizou ao final de 2021 cerca de 14 milhões de toneladas de matrizes de corte produzidas. Um aumento de 3,28% em relação ao ano de 2020, o que manteve o país como o 3º maior produtor de matrizes de corte do mundo. Desse total, cerca de 68% correspondem ao mercado interno,

enquanto o restante representa a parcela destinada à exportação, valor que tornou o Brasil o maior exportador de matrizes de corte do globo. Para chegar ao consumidor final, o frango de corte precisa passar por diferentes etapas de processamento, as quais geram diferentes tipos de resíduos, uma vez que o principal objeto de comércio é o filé. Compõem os resíduos da avicultura: pés, pele, penas, bicos e vísceras, sendo as penas o resíduo de maior quantidade (GUAN *et al.*, 2023). A Política Nacional De Resíduos Sólidos instituída em 2010 não abrange especificamente os Resíduos da avicultura, caracterizando-os como resíduos industriais orgânicos, o que exige apenas a elaboração de um plano de gerenciamento de resíduos, que geralmente resulta em criação de aterros ou em incineração dos mesmos. A desvantagem desses atuais métodos de gerenciamento são os problemas ambientais e sanitários de médio à longo prazo como eutrofização do solo, geração de compostos nitrogenados, condução de agentes patógenos, propagação de zoonoses além de outros mais responsáveis por diversas das mais recentes crises ecológicas e epidemiológicas do globo (ABDUMULNEM *et al.*, 2022). Nesse contexto, a bioprospecção aqui age diretamente como uma forma alternativa de solucionar essa problemática que é o descarte e os métodos de tratamento errôneos de resíduos da avicultura. Rani *et al.*, (2023) em seu estudo envolvendo agressões de agroquímicos a solos do tipo rizosfera, desenvolveram microcápsulas para serem invólucros de *E. ludwigii*-PS10 a partir de uma formulação contendo alginato, amido, hidróxido de zinco e resíduos. Essa bactéria colonizadora da rizosfera possui a capacidade de diminuir os danos causados pelo uso de agroquímicos no solo, entretanto, sua estabilidade a condições ambientais faz com que essa espécie a princípio não seja tão efetiva como método direto de tratamento de solo. A criação das microcápsulas pelo método de extrusão permitiu que essas linhagens obtivessem maior estabilidade, atuando assim no aumento do teor de zinco no solo e aumentassem significativamente a biomassa vegetal

dos solos do tipo rizosfera. Além deste, outros estudos visam a bio-prospecção microbiana em diferentes tipos de resíduos como vísceras, esterco e peles (KSHETRI *et al.*, 2022).

Ainda assim, as penas correspondem ao maior percentual dos resíduos gerados pela avicultura. As penas são estruturas presentes nas aves e são responsáveis pelo auxílio em diversas atividades como retenção de líquido, voo, planação, proteção contra a dessecação e contra variações abruptas de temperatura, além de atrair parceiros para cópula e reprodução no caso de algumas espécies (GUAN *et al.*, 2023). Alguns organismos possuem a capacidade de assimilar pigmentos às suas penas, que obtém a coloração do pigmento assimilado. O principal componente químico das penas é a queratina, que compreende cerca de 83% da estrutura total das penas. A queratina é uma macromolécula biológica presente em diferentes tecidos superficiais como cabelos, unhas, escamas, penas, plumas e chifres (KSHETRI *et al.*, 2022). Essa proteína subdivide-se em dois grandes grupos de acordo com o arranjo estrutural das suas cadeias. As alfa-queratinas são estruturas cujo arranjo espacial consiste em cadeias primárias de aminoácidos enroladas em torno de um eixo imaginário em conformação de hélice enquanto as beta-queratinas possuem um arranjo de cadeias de aminoácidos lado a lado, em conformação de “folha” ou pregueamento. As alfa-queratinas possuem mais aminoácidos apolares o que garante uma menor solubilidade em água (QIN *et al.*, 2023). A queratina é uma proteína bastante rígida devido a presença de interações iônicas entre seus grupos de radicais, o que impossibilita a sua hidrólise por meio de substâncias usuais como ácidos e alguns tipos de proteases (QIN *et al.*, 2023). Uma das formas mais efetivas de hidrólise da queratina é a utilização de enzimas queratinolíticas. As enzimas queratinolíticas ou queratinases são proteases responsáveis pela hidrólise da queratina por meio da clivagem de interações

iônicas entres íons sulfeto presentes principalmente nas alfa-queratinas (JANA *et al.*, 2022).

Alguns microrganismos conseguem produzir queratinases para poder utilizar a queratina como fonte de nutriente a partir dessa reação de hidrólise, o que atrai o interesse de diversos pesquisadores no que se refere a bioprospecção de microrganismos. Kadmy *et al.*, (2023) conseguiram obter enzimas queratinolíticas através da fermentação de *Actinobacter baumannii* em um meio contendo penas. Além da redução desses poluentes iniciais e da produção de uma enzima de valor comercial, como resultado os autores também conseguiram associar as queratinases produzidas a um material a base de grafeno, aumentando consideravelmente a sua atividade antibiofilme. Kshreti *et al.*, (2022) também pesquisando esses resíduos da avicultura, conseguiram isolar peptídeos hidrolisados utilizando duas espécies distintas de microrganismos, sendo elas: *Streptomyces tanashiensis*-RCM-SSR-6 e *Bacillus sp.* RCM-SSR-102. Como resultados, os autores evidenciaram diferentes perfis moleculares para os peptídeos isolados pelas espécies supracitadas. Análises como eletroforese e FTIR constataam diferenças significativas quanto aos peptídeos isolados pelas espécies, o que detonou uma alta capacidade de produção de peptídeos por parte dos microrganismos. Além disso, os autores fizeram breves análises a respeito da bioatividade desses microrganismos, constatando resultados positivos para atividades antioxidante e antitirozinase. De fato, peptídeos de queratina são formas moleculares promissoras, com uma gama de características físico-químicas que podem divergir de um peptídeo a outro ou a partir de métodos de obtenção, parâmetros de análises e tempo de obtenção.

2.5. Bioprospecção de resíduos da Suinocultura

De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) em seu relatório de perspectivas para a agropecuária, a produção pela suinocultura de corte em 2022 foi de 4,8 milhões de toneladas de carne suína, valor que faz com que o Brasil seja o 4º maior produtor deste produto. Diferente de outras matrizes animais, a produção suína não gera muito resíduo diretamente ligado a espécie produzida, entretanto, fezes, água utilizada para higienização, ureia, pelos e outros materiais consistem nos subprodutos gerados por essa atividade agropecuária. Grande parte dos resíduos são utilizados em outras áreas, principalmente para produção de biofertilizantes. Ainda assim, há formas alternativas para sua utilização, sobretudo a partir da bioprospecção microbiana. Nguyen *et al.*, (2022) em seu experimento com microrganismos de metano conseguiram produzir biohitano, um biocombustível derivado do metano e hidrogênio a partir dos resíduos da suinocultura e que se apresenta como uma fonte de combustível alternativa ao etanol. Lian *et al.*, (2021) conseguiram otimizar a produção de lactato a partir de bactérias do gênero *Lactobacillus* e *Clostridium* a partir de fezes suínas e resíduos de maçãs. Esses estudos contribuíram ainda mais para a percepção da importância dos microrganismos em diferentes setores industriais bem como para o seu vasto potencial de aplicabilidade.

3. CONCLUSÃO

As formas de vida unicelulares denominadas como microrganismos vem sendo utilizadas pela humanidade há milênios, com contribuições de extrema importância para a nossa evolução, desde vacinas, fármacos, biomateriais, biocombustíveis, suplementos alimentares e outros mais produtos. Na agropecuária, os microrga-

nismos podem agir diretamente provendo compostos que atendam a necessidade desse grande setor, mas principalmente agregando valor aos subprodutos gerados por esta atividade sob as mais diferentes condições. Os resultados evidenciados ao longo do capítulo denotam as mais variadas formas de se agregar valor a esses resíduos a partir de processos não muito complexos ou caros. Esse breve vislumbre abre espaço para um diálogo a respeito das novas formas de se moldar a economia, uma que não envolve extração e degradação, mas sim inovação e reutilização. Os principais microrganismos utilizados para os estudos supracitados são principalmente do grupo das bactérias e dos fungos. Esses microrganismos são amplamente distribuídos ao longo do globo e por isso têm fácil aquisição por parte dos centros de pesquisas. Os métodos para esporulação e fermentação desses organismos são métodos em sua maioria simples e que demandam pouco custo de produção, o que torna esses tipos de pesquisas ainda mais vantajosas. Os estudos analisados também corroboram com a idéia de que todo o resíduo sólido orgânicos agroindustrial, independente do setor pelo qual foi gerado, pode ter funcionalidade do ponto de vista da bioprospecção.

Por fim, têm-se com os fatos apresentados que o potencial da utilização dos microrganismos como ferramenta para o desenvolvimento sustentável é amplo e incalculável até o presente momento, portanto, novas pesquisas com esses espécimes de valor inestimável do ponto da ecologia e biotecnologia devem ter maior investimentos, para que assim, haja uma evolução social quanto às problemáticas no que se refere ao *status quo* do cenário ambiental.

4. REFERÊNCIAS

ABDULMUNEM, A. R.; SAMIN, P. M.; SOPIAN, K.; HOSEINZADEH, S.; JABER, H. A. A.; GARCIA, D. A.; Waste chicken feathers integrated with phase change materials as new inner insulation envelope for buildings. **Journal of Energy Storage**. v.56ptA, 2022.

BALLARDO, C.; ABRAHAM, J.; BARRENA, R.; ARTOLA, A.; GEA, T.; SÁNCHEZ, A.; Valorization of soy waste through SSF for the production of compost enriched with *Bacillus thuringiensis* with biopesticide properties. **Journal of Environmental Management**. V.169, p126-131, 2016.

BARROS, R. S.; CONTRERAS, M. D.; MORRIS, F. R.; CHAMORRO, M. V.; ARRIETA, A. A.; Evaluation of the methanogenic potential of anaerobic digestion of agro-industrial wastes. **Heliyon**. v.9, 2023.

ENG, F.; FUESS, L. T.; WINKLER, P. B.; ETCHEBEHERE, C.; SAKAMOTO, I. K.; ZAIAT, M.; Optimization of volatile fatty acid production by sugarcane vinasse dark fermentation using a response surface methodology. Links between performance and microbial community composition. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**. v.53, 2022.

FELIPE, M. T. C.; BARBOSA, R. N.; BEZERRA, J. D. P.; MOTTA, C. M. S.; Production of kojic acid by *Aspergillus* species: Trends and applications. **Fungal Biology Reviews**. v.45, 2023.

FONTOURA, R.; DAROIT, D. J.; CORRÊA, A. P. F.; MORESCO, K. S.; SANTI, L.; SILVA, W. O. B.; YATES III, J. R.; MOREIRA, J. C. F.; BRANDELLI, A.; Characterization of a novel antioxidant peptide from feather keratin hydrolysates. **New Biotechnology**. v.49, p71-76, 2019.

GHONEMY, D. H.; ALI, T. H.; Effective bioconversion of feather-waste keratin by thermo-surfactant stable alkaline keratinase produced from *Aspergillus* sp. DHE7 with promising biotechnological applica-

tion in detergent formulations. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**. v.35, 2021.

GICANA, R. G.; YEH, F. I.; HSIAO, T. H.; CHIANG, Y. R.; YAN, J. S.; WANG, P. H.; Valorization of fish waste and sugarcane bagasse for Alcalase production by *Bacillus megaterium* via a circular bioeconomy model. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**. v.135, 2022.

GOPALIYA, D.; ZAIDI, S.; SRIVASTAVA, N.; RANI, B.; KUMAR, V.; KHARE, S. K.; Integrated fermentative production and downstream processing of L-malic acid by *Aspergillus wentii* using cassava peel waste. **Bioresource Technology**. v.377, 2023.

GUAN, L. Y.; SHI, M. W.; LONG, J. J.; A novel and green method for recycling of waste feather for down via flash explosion with supercritical carbon dioxide. **Science of the Total Environment**. v.870, 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Produção de cana-de-açúcar. **IBGE**. 2022.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Diagnóstico dos resíduos orgânicos do setor agrossilvopastoril e agroindustriais associadas. **Repositório de Conhecimento do IPEA**. 2012.

JANA, A.; KAKKAR, N.; HALDER, S. K.; DAS, A. J.; BHASKAR, T.; RAY, A.; GHOSH, D. Efficient valorization of feather waste by *Bacillus cereus* IIPK35 for concomitant production of antioxidant keratin hydrolysate and milk-clotting metallo-serine keratinase. **Journal of Environmental Management**. v.324, 2022.

KADMY, I. M. S.; AZIZ, S. N.; SUHAIL, A.; ABID, S. A.; NAJI, E. N.; KADMY, Z. A.; ALGAMMAL, A. M.; AHMED, H. R.; KHODEER, D. M.; BATIHA, G. E. S.; HETTA, H. F.; Enhancing the anti-biofilm activity of novel keratinase isolated from *Acinetobacter baumannii* using

Reduced Graphene oxide: A way to recycle feather waste pollution. **Cleaner Waste System**. v.5, 2023.

KSHETRI, P.; SINGH, P. L.; CHANU, S. B.; SINGH, T. S.; RAJIV, C.; TAMREIHAO, K.; SINGH, H. N.; CHONGTHAM, T.; DEVI, A. K.; SHARMA, S. K.; CHONGTHAM, S.; SINGH, M. N.; DEVI, Y. P.; DEVI, H. S.; ROY, S. S.; Biological activity of peptides isolated from feather keratin waste through microbial and enzymatic hydrolysis. **Electronic Journal of Biotechnology**. v.60, p11-18, 2022.

MARTINS, G. L.; SOUZA, A. J.; MENDES, L. W.; GONTIJO, J. B.; RODRIGUES, M. M.; COSCIONE, A. R.; OLIVEIRA, F. C.; REGITANO, J. B.; Physicochemical and bacterial changes during composting of vegetable and animal-derived agro-industrial wastes. **Bioresource Technology**. v.376, 2023.

PENG, S.; LI, H.; ZHANG, S.; ZHANG, R.; CHENG, X.; LI, K.; Isolation of a novel feather-degrading *Ectobacillus* sp. JY-23 strain and characterization of a new keratinase in the M4 metalloprotease family. **Microbiological Research**. v.274, 2023.

QIAO, N.; WANG, C.; DU, Y.; ZHANG, X.; HU, S.; YU, D.; *Cunninghamella echinulata* produced from soybean wastewater cleanly harvests oleaginous yeasts in soybean oil refinery effluent by efficient adhesion and improves microbial lipid quality. **Journal of Cleaner Production**. v.365, 2022.

QIN, X.; YANG, C.; GUO, Y.; LIU, J.; BITTER, J. H.; SCOTT, E. L.; ZHANG, C.; Effect of ultrasound on keratin valorization from chicken feather waste: Process optimization and keratin characterization. **Ultrasonics Sonochemistry**. v.93, 2023.

SHARMA, I.; KANGOI, N.; Production and characterization of keratinase by *Ochrobactrum intermedium* for feather keratin utilization. **International Journal of Macromolecules**. v.166, p1046-1056, 2021.

SHI, H.; ZHANG, M.; WHANG, W.; DEVAHASTIN, S.; Solid-state fermentation with probiotics and mixed yeast on properties of okara. *Food Bioscience*. v.36, 2020.

SIRIPURAPU, A.; KVN, V.; SHIVSHETTY, N.; POOSARLA, V. G.; Production and characterization of biodegradable polymer-polyhydroxybutyrate from agricultural waste-sugarcane bagasse by the novel marine bacterium *Klebsiella pneumoniae* G1. **Bioresource Technology**. v.20, 2022.

SIRONI, P. B.; MAZOTTO, A. M.; LIMA, M. F.; NOGUEIRA, R. I.; MIGUEL, A. S. M.; VERMELHO, A. B.; Hydrolyzed feather keratin obtained by microbial fermentation encapsulated with maltodextrin – A sustainable approach to increase digestible protein in feed. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**. v.40, 2022.

SMIRNOVA, M.; LOSADA, C. B.; AKULAVA, V.; ZIMMERMANN, B.; KOHLER, A.; MIAMIN, U.; OOSTINDJER, M.; SHAPAVAL, V.; New cold-adapted bacteria for efficient hydrolysis of feather waste at low temperature. **Bioresource Technology Reports**. v.23, 2023.

SPADOTTO, C.; RIBEIRO, W.; Gestão de resíduos na agricultura e agroindústria. São Paulo: FEFAP, 2006.

TAOKAEW, S.; NAKSON, N.; ZHANG, X.; KONGKLIENG, P.; KOBAYASHI, T.; Biotransformation of okara extracted protein to nanocellulose and chitin by *Gluconacetobacter xylinus* and *Bacillus pumilus*. *Bioresource Technology Reports*. v.17, 2022.

TELLES, D. D.; Resíduos sólidos: Gestão sustentável e responsável. 1ª Edição. São Paulo –Brasil. **Blucher**, 2022.

TULY, J. A.; ZABED, H. M.; NIZAMI, A. S.; HASSAN, M.; AZAM, R.; AWASTHI, M. K.; JANET, Q.; CHEN, G.; TSIGBE, N. D. K. A.; MA, H.; Bioconversion of agro-food industrial wastes into value-added pepti-

des by a *Bacillus* sp. Mutant through solid-state fermentation. **Biore-source Technology**. v.346, 2022.

VETHATHIRRI, R. S.; SANTILLAN, R.; THI, S. S.; HOON, H. Y.; WUERTZ, S.; Microbial community-based production of single cell protein from soybean-processing wastewater of variable chemical composition. **Science of the Total Environment**. v.873, 2023.

WANG, R.; THAKUR, K.; FENG, J. Y.; ZHU, Y. Y.; ZHANG, F.; RUS-SO, P.; SPANO, G.; ZHANG, J. G.; WEI, Z. J.; Functionalization of soy residue (okara) by enzymatic hydrolysis and LAB fermentation for B₂ bio-enrichment and improved *in vitro* digestion. **Food Chemistry**. v.387, 2022.

YANG, L. C.; FU, T. J.; YANG, F. C.; Biovalorization of soybean re-sidue (okara) via fermentation with *Ganoderma lucidum* and *Lentinus edodes* to attain products with high anti-osteoporotic effects. **Journal of Bioscience and Bioengineering**. v.129, p514-518, 2020.

CAPÍTULO 5

MICORREMEDIAÇÃO: UMA ABORDAGEM SUSTENTÁVEL PARA TRATAR EFLUENTES DA INDÚSTRIA TÊXTIL

Anna Gabrielly Duarte Neves¹

Raphael Luiz Andrade Silva²

Adriane Caroline Batista Oliveira³

Kethylen Barbara Barbosa Cardoso⁴

Ana Lúcia Figueiredo Porto⁵

Romero Marcos Pedrosa Brandão Costa⁶

DOI: 10.46898/rfb.9786558895886.5

1 Departamento de Morfologia e Fisiologia Animal – Universidade Federal Rural de Pernambuco

2 Instituto de Ciências Biológicas – ICB, Universidade de Pernambuco

3 Departamento de Morfologia e Fisiologia Animal – Universidade Federal Rural de Pernambuco

4 Centro de Biociências - CB, Universidade Federal de Pernambuco

5 Departamento de Morfologia e Fisiologia Animal – Universidade Federal Rural de Pernambuco

6 Instituto de Ciências Biológicas – ICB, Universidade de Pernambuco

RESUMO

A indústria têxtil é uma das mais antigas e abrange desde a produção de fios até a distribuição de tecidos e confecções. No entanto, o processamento industrial têxtil gera grandes volumes de efluentes contaminados, que podem causar impactos ambientais e à saúde humana. Esse capítulo tratará de abordagens sustentáveis para a recuperação desses efluentes. Para a realização deste estudo, foram consultadas diversas bases de dados científicas para obter informações sobre a história da indústria têxtil, seu desenvolvimento ao longo do tempo, a produção atual, as características dos efluentes têxteis e seus impactos ambientais. A indústria têxtil é uma das mais antigas da história da humanidade, com produção de tecidos e roupas retratada desde o período Neolítico. Atualmente, é uma das maiores indústrias globais, produzindo mais de 100 milhões de toneladas de têxteis anualmente e gerando bilhões em exportação. No entanto, essa produção em massa também resulta em grandes volumes de efluentes têxteis, que contêm diversos compostos químicos tóxicos, incluindo corantes, metais pesados e outros produtos químicos utilizados nos processos de tingimento e acabamento. Esses efluentes podem causar sérios impactos ambientais, contaminando corpos hídricos e afetando a vida aquática. Além disso, os compostos químicos presentes nos efluentes têxteis também representam riscos à saúde humana, podendo causar diversos problemas de saúde.

Palavras-chave: Indústria têxtil, Efluentes têxteis, Impacto ambiental, Tratamento de efluentes, Micorremediação.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a indústria têxtil desempenha um papel notável na criação de oportunidades de emprego e na geração de riqueza. De

acordo com os dados da Associação Brasileira da Indústria Têxtil - ABIT (2018), o país é o quarto maior produtor mundial de malhas e denim, contribuindo com 16,7% dos empregos e 5,7% do faturamento no setor de transformação. Essa indústria emprega diretamente 1,5 milhão de brasileiros e indiretamente 8 milhões. Com aproximadamente 30 mil empresas espalhadas por todo o território nacional, as regiões sul e sudeste concentram a maior quantidade de unidades fabris. O faturamento da cadeia têxtil e de confecção brasileira atinge anualmente cerca de US\$ 51,58 bilhões (ABIT, 2018), ressaltando a relevância significativa desse setor para a economia do país.

Contudo, é importante considerar a questão ambiental ao analisar a Resolução CONAMA N° 237, datada de 19 de dezembro de 1997. Esta resolução identifica as indústrias têxteis, de vestuário, calçados e artefatos de tecidos como atividades potencialmente geradoras de poluição, devido às características dos seus efluentes, que tornam a degradação do meio ambiente um desafio. Esse cenário é influenciado principalmente pela presença de corantes, amplamente utilizados no processo de coloração dos tecidos, porém, que não se fixam completamente durante o tingimento. A demanda por corantes é alta e diversificada, sendo destinada não apenas à indústria têxtil, mas também às indústrias de artefatos de couro, papel, alimentícias, cosméticos, tintas e plásticos. Diante dessa necessidade, é urgente a busca por soluções econômicas e ecológicas que possam ser aplicadas neste sentido.

Felizmente, os microrganismos vêm sendo apontados como capazes de degradar efluentes têxteis poluentes de forma mais eficiente, uma vez que algumas espécies de têm a capacidade natural de metabolizar corantes, contribuindo para a redução do impacto ambiental. Além disso, enzimas produzidas por microrganismos também pode auxiliar na remoção de corantes indesejáveis. A in-

corporação responsável de organismos e suas habilidades biológicas inovadoras pode, portanto, representar uma importante solução colaborativa para mitigar os desafios ambientais enfrentados pela indústria têxtil (RAJA *et al.*, 2016).

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Indústria Têxtil

Por definição o termo têxtil se refere à produção de tecidos a partir de fios, no entanto se tornou comum definir a indústria têxtil como uma cadeia de processamento desde a produção de fios até a distribuição de têxteis e confecções.

A produção de tecidos e a confecção de roupas é retratada desde o início do período Neolítico, ou seja, desde a Idade da Pedra. Dados arqueológicos mostram que os têxteis mais antigos identificados até o momento foram encontrados no Extremo Oriente da Rússia, produzidos da fibra das folhas de junco e datados entre 8400 a 9400 anos atrás. Como esses tecidos eram produzidos de fibras naturais a decomposição faz com que poucos tenham sido identificados e datados, mas evidências mostram estátuas esculpidas com vestimentas de pano datadas da Era Paleolítica, mais de 20 mil anos atrás (GLEBA *et al.*, 2021).

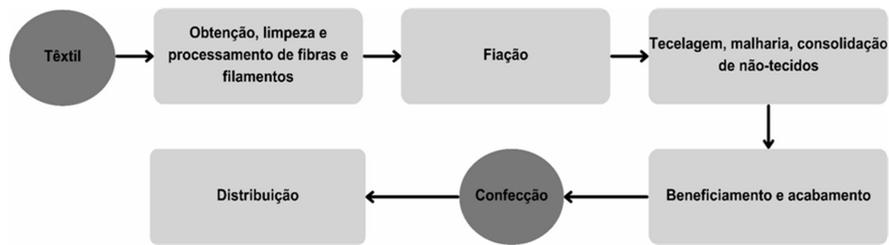
Até o início da revolução industrial os tecidos e confecções eram feitos em pequenas escalas de forma artesanal. Somente no final do século XVIII com o surgimento da máquina de fiar Jenny em 1764 e do tear mecânico em 1784, iniciaram as produções em massa, e assim, surgiu a indústria têxtil. Isso fez dessa indústria umas das precursoras da revolução industrial, com a instalação de grandes fábricas e o desen-

volvimento econômico e progresso tecnológico da Europa e América do Norte (RUSTAMJONOVICH, 2023).

A indústria têxtil continua sendo uma das maiores indústrias globais, de forma que a produção de fios, tecidos e confecções são essenciais para a sociedade. Somente em 2016, essa indústria produziu mais de 100 milhões de toneladas de têxteis (ROOS et al., 2019). Segundo o *World Trade Statistical Review 2022* da Organização Mundial do Comércio, a exportação de roupas em 2021 ultrapassou US\$548,8 bilhões e a de produtos têxteis chegou a US\$354,2 bilhões (WTO, 2022). Ainda, segundo as Nações Unidas a indústria têxtil e de confecções contribui com US\$2,4 trilhões em manufatura globalmente, e emprega mais de 300 milhões de pessoas em toda a cadeia de produção (*United Nations Alliance For Sustainable Fashion*). Os países predominantes na fabricação e processamento têxtil são China, Índia, Paquistão, Indonésia, Taiwan, Turquia, Bangladesh, Coréia do Sul, EUA e Brasil (ACHAW & DANSO-BOATENG, 2020).

2.2. Processamento Industrial Têxtil

O setor têxtil é vasto e complexo, e inclui vários subsetores heterogêneos envolvidos nas etapas de produção, distribuídos principalmente entre pequenas e médias empresas. As etapas produtivas da cadeia têxtil vão desde a conversão das matérias primas (fibras e filamentos) até a distribuição e comercialização (Figura 1), o que em geral, envolve várias empresas/instalações, de acordo com a especialização do subsetor, podendo ser responsável pela fabricação ou processamento de commodities têxteis (ACHAW & DANSO-BOATENG, 2020).

Figura 1. Fluxograma da cadeia produtiva da indústria têxtil e de confecções

Fonte: autores (2023)

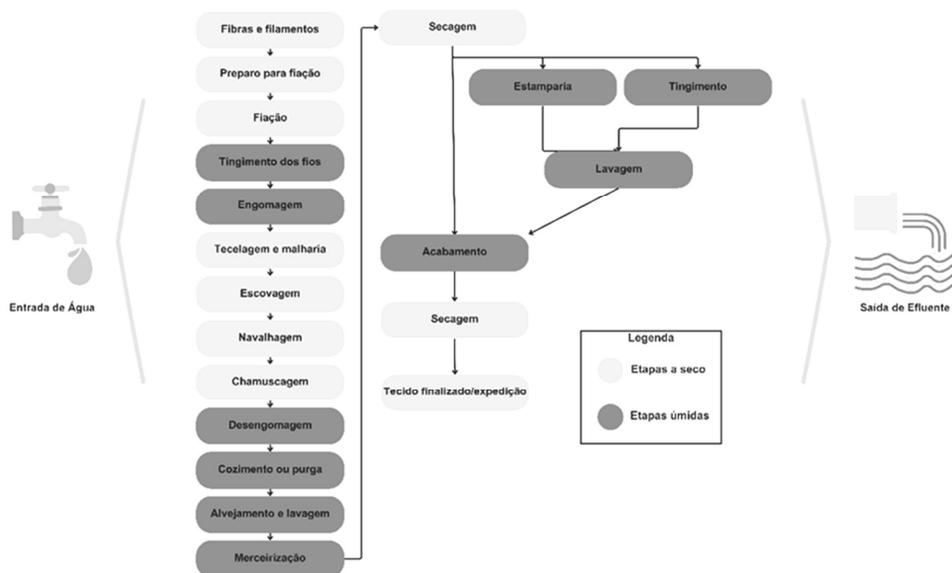
A matéria prima base da indústria têxtil são as fibras e filamentos, que diferem entre si somente pelo comprimento. A fibra é uma estrutura linear flexível, contínua ou descontínua, e cujo comprimento é geralmente maior que sua largura (comumente têm entre 1-10 cm), enquanto os filamentos podem ter quilômetros de comprimento. Essa matéria prima pode ser natural, artificial ou sintética, podendo haver integração de mais de um tipo de fibra/filamento para composição de tecidos complexos. As fibras naturais podem ser de origem vegetal, animal ou mineral, enquanto as fibras não naturais podem ser obtidas de proteínas regeneradas, chamadas de fibras artificiais, ou a partir de derivados do petróleo, as fibras sintéticas (O'HAIRE & GOSWAMI, 2018).

A fibra adquirida é processada (abertura, cardagem, trefilação, penteação e outros) para formar fios durante o processo de fiação, onde uma mecha de fibra/filamento passa por um sistema de estiramento para formar um fio contínuo. A fiação, juntamente com a tecelagem, malharia, produção dos não tecidos e o beneficiamento são as principais fases do processamento têxtil.

Entre essas fases ocorrem as etapas operacionais, que podem ser processos úmidos ou secos (YASEEN & SCHOLZ, 2019). Os processos operacionais mais comuns da indústria têxtil são a engomagem e desengomagem, lavagem, alvejamento, mercerização e tingimento. Todos processos úmidos, que conferem as proprieda-

des desejadas no têxtil, como aumento da resistência, remoção de impurezas, remoção de coloração natural ou indesejada, aumento da capacidade de tingimento, aumento do brilho e maciez, e adição de cor (CARMEN & DANIELA, 2012). Um resumo pode ser visto na Figura 2.

Figura 2. Fluxograma das etapas operacionais que utilizam água no processamento da indústria têxtil e de confecções



Fonte: autores (2023)

2.3. Composição dos Efluentes Têxteis

A necessidade do processamento úmido para agregar valor aos produtos têxteis e obter um produto final desejado, faz com que as indústrias têxteis utilizem grandes volumes de água. Há uma estimativa que para os processos úmidos uma instalação média da indústria têxtil pode consumir até 1,6 milhão de litros de água por dia para processar 8 toneladas de têxteis. 16% desse volume é destinado aos processos de tingimento, e toda essa água consumida, sai do ciclo produtivo como efluente têxtil, descartados em corpos hídricos, fre-

quentemente tratados parcialmente ou sem tratamento (ACHAW & DANSO-BOATENG, 2020).

Segundo a NBR 9800/1987 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), efluente industrial é todo despejo líquido oriundo dos processos industriais, incluindo a água utilizada nas etapas produtivas e para lavagens operacionais, como limpeza de equipamentos e preparo de soluções, e que apresentem grau poluidor devido aos produtos aplicados ou produzidos na instalação. Assim, toda água utilizada durante o processamento úmido têxtil é descartada como efluente industrial.

Ao longo das etapas produtivas úmidas o efluente se torna complexo em compostos químicos, em coloração, e em variação de parâmetros como pH, temperatura, sólidos dissolvidos, sólidos suspensos, Demanda Química e Demanda Bioquímica de Oxigênio, reduzindo a concentração de oxigênio no corpo aquático, principalmente pela presença de hidrossulfetos (BHATIA *et al.*, 2018). A indústria têxtil usa atualmente mais de 8000 químicos diferentes, entre eles estão sais, ácidos, aglutinantes, surfactante, fenóis, ftalatos, compostos orgânicos voláteis, metais pesados, óleos, cera, detergente e diversos outros adicionados conforme o objetivo da etapa produtiva (KISHOR *et al.*, 2021).

Os processos operacionais que tornam o efluente tóxico e uma matriz tão complexa são: engomagem, desengomagem, limpeza/lavagem, branqueamento, merceirização, tingimento, estamparia e a finalização/acabamento (BIDU *et al.*, 2021). Onde os primeiros são considerados pré-tratamentos, e preparam o tecido para o tingimento, impressão, estamparia e acabamento, e a sequência de operação ou a quantidade de repetições varia conforme a matéria prima, ou seja, conforme a fibra ou filamento utilizado.

Os pré-tratamentos consomem entre 18 e 42% de toda água utilizada durante o processamento úmido, e em geral usam somente água macia, ou seja, água com quantidades mínimas de sais, com teores em carbonato de cálcio menores que 60 mg/L, próprias para consumo e que são geralmente retiradas de poços ou de corpos hídricos superficiais (PANDA *et al.*, 2021).

Dentre os pré-tratamentos e o beneficiamento, os processos que mais poluem o meio ambiente são a desengomagem e o tingimento. A desengomagem é o processo que mais gera águas residuais e alta demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO), onde para a remover a goma de 1 tonelada de tecido são produzidos 45,5 kg de DBO e 91 kg de DQO (PANDA *et al.*, 2021). Já para o tingimento estima-se que sejam utilizados entre 50 e 200 L de água para obter 1 kg tecido colorido (Khan *et al.*, 2022), e como alguns corantes possuem apenas 70% de esgotamento em banhos, não se fixando as fibras, são perdidas aproximadamente 280.000 toneladas de corantes nas águas residuais ao ano (ACHAW & DANSO-BOA-TENG, 2020).

2.4. Impacto Ambiental dos Efluentes Têxteis

Por alguns dos compostos presentes nos efluentes serem persistentes na cadeia alimentar, sofrendo biomagnificação, organismos de níveis tróficos mais elevados têm maior exposição aos contaminantes. Cátions de metais pesados, por exemplo, foram reportados bioacumulando em tecidos de peixes, cujo fluxo ocorre através das brânquias (LELLIS *et al.*, 2019). Como os peixes e outros organismos da biota aquática são sensíveis a pequenas variações do ecossistema, seu CL_{50} para contaminantes é de até 1 mg/L, no entanto, a concentração observada nos corpos hídricos após a liberação de efluentes é muito superior, e somente para corantes têxteis é estimado que alcance mais

que 100 mg/L, causando a morte de diversas espécies aquáticas e a diminuição da diversidade (BERRADI *et al.*, 2019).

Além dos efeitos ecológicos, os químicos utilizados pela indústria têxtil colocam em risco a saúde humana, sendo relatados efeitos tóxicos, mutagênicos, cancerígenos e genotóxicos, associados principalmente a carga de corantes nas águas residuais. Alguns desses efeitos são: câncer de rim, câncer de bexiga, câncer de fígado, dermatite de contato, alergias nos olhos, irritação na pele, urticária, doenças respiratórias, irritação de mucosas, distúrbios no sistema nervoso central e outros (MANI *et al.*, 2019).

2.5. Métodos Biológicos no Tratamento de Efluentes Têxteis

Diante dos efeitos deletérios dos efluentes têxteis, diversos tratamentos têm sido testados e aplicados para diminuição da toxicidade desses resíduos, incluindo tratamentos específicos para corantes têxteis, que culminam na mineralização parcial ou total desses contaminantes.

A biorremediação inclui um conjunto de processos utilizados para remover, decompor, neutralizar e/ou reduzir contaminantes e sua toxicidade em ambientes poluídos (LIRA *et al.* 2022). As técnicas aplicadas são normalmente dependentes do metabolismo do agente biorremediador, a partir de processos que utilizam energia, como oxidação, redução, acumulação e precipitação (VARJANI & UPASANI, 2016).

A utilização de fungos para biorremediar contaminantes é chamada micorremediação, uma metodologia considerada extremamente eficiente, principalmente pela capacidade de adaptação a condições ambientais e nutritivas desses organismos. Isso faz da

micorremediação uma tecnologia barata, sustentável, e passível de modificação, seja ela genética, a partir do melhoramento, ou bioquímica, a partir do estresse ambiental e nutricional das cepas biorremediadoras (PRZYSTAŚ *et al.* 2018).

A micorremediação ocorre através dos mecanismos isolados ou simultâneos de biodegradação, bioacumulação e/ou biossorção de compostos, variando de acordo com o metabolismo, tolerância e outras características dos fungos (PRZYSTAŚ *et al.* 2018).

2.6 Biodegradação

A degradação biológica consiste na decomposição ou quebra de algum contaminante, onde o microrganismo usa o mesmo como fonte de carbono para obtenção de energia (KUMARY & KUMAR, 2020). Esse processo é dependente do metabolismo do fungo, podendo ocorrer a partir de enzimas extracelulares e intracelulares (KAUSHIK & MALIK, 2009). As enzimas extracelulares são secretadas para o meio, e as mais comuns são hidrolíticas e oxidativas, como lacases, manganês peroxidase e lignina peroxidase. Já entre as enzimas intracelulares, a mais estudada na biorremediação fúngica é a citocromo P450 monooxigenase (SHOURIE & VIJAYALAKSHMI, 2022).

Os fungos de podridão branca, particularmente espécies do gênero *Phanerochaete* sp., são referidos como excelentes agentes biodegradantes (JUCKPECH *et al.*, 2011). De forma semelhante, os fungos do gênero *Aspergillus* sp. são mencionados na literatura como fungos capazes de degradar compostos aromáticos presentes em efluentes têxteis (SHEAM *et al.*, 2021). O mecanismo de biodegradação desempenhado por esses microrganismos pode ser melhorado a partir da temperatura, concentração do pH e condições de tempo de contato.

2.7. Biossorção

A biossorção não depende da utilização de energia metabólica, e sua principal função é a remoção do contaminante. Esse processo ocorre pela adsorção na superfície da célula ou nos sítios ativos do biossorvente, o que permite a ligação de diversos tipos de moléculas. Ocorre a partir da interação entre os grupos funcionais do biossorvente, disponibilizado pelos heteropolissacarídeos, proteínas e lipídeos da parede celular do fungo, e os corantes, formando complexos a partir de interações físicas e/ou químicas (ALMEIDA & CORSO, 2019;). A eficiência da adsorção é refletida principalmente pela força da interação iônica entre o adsorvente e o adsorvato (ELGARAHY *et al.*, 2021). Além disso, esse processo pode ser realizado com a biomassa viável ou inviabilizada, ou seja, com a biomassa ativa ou morta. E o adsorvente pode ser reutilizado em diversos ciclos, existindo ainda, a possibilidade de recuperação do contaminante após adsorção (BENI & ESMAEILI, 2019).

Segundo a literatura, fungos do gênero *Aspergillus* possuem alto potencial de biossorção como método de remoção de corantes. A espécie *Aspergillus niger* através de seus grupos funcionais, conseguiu adsorver os corantes *Basic Blue 9* e *Congo Red* (SEN *et al.*, 2016). Já a espécie *Achaetomium strumarium* que removeu o corante *Acid Red 88* (BANKOLE *et al.*, 2018).

Dessa forma, o uso de fungos como biossorventes revela-se uma alternativa sustentável para remoção de contaminantes, além de ser um processo de baixo custo de aplicação e alta seletividade.

3. CONCLUSÃO

A indústria têxtil brasileira desempenha um papel crucial na economia, gerando empregos e riqueza significativa. No entanto, o

impacto ambiental dos efluentes têxteis é um desafio que não pode ser ignorado. A busca por soluções econômicas e ecológicas é urgente. Felizmente, os microrganismos têm se mostrado promissores como aliados na solução desse problema. Através da biorremediação, especialmente com o uso de fungos, é possível degradar e remover eficientemente os contaminantes dos efluentes têxteis, oferecendo uma importante alternativa sustentável para mitigar os desafios ambientais enfrentados pela indústria têxtil brasileira. É essencial que esforços sejam direcionados para o desenvolvimento e aplicação dessas tecnologias para garantir um futuro mais sustentável para o setor têxtil e o meio ambiente como um todo.

4. REFERÊNCIAS

ACHAW & DANSO-BOATENG. Textile and fabric manufacture. **Chemical and Process Industries**, p. 67–105, 2020.

ALMEIDA & CORSO. Decolorization and removal of toxicity of textile azo dyes using fungal biomass pelletized. **International Journal of Environmental Science and Technology**, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INDÚSTRIA TÊXTIL – ABIT. **Perfil do Setor**, 2018.

BANKHOLE *et al.*, Enhanced decolorization and biodegradation of acid red 88 dye by newly isolated fungus, *Achaetomiumstrumarium*. **Elsevier**, 2017.

BHÁTIA *et al.*, Physicochemical assessment of industrial textile effluents of Punjab (India). **Applied Water Science** Article. n. 83, 2018.

BERRADI, *et al.*,. Textile finishing dyes and their impact on aquatic environs. **Heliyon**. 5. 10.1016/j.heliyon.2019.e02711, 2019.

BIDU *et al.*, Current status of textile wastewater management practices and effluent characteristics in Tanzania. **Water SciTechnol**, v. 83, n. 10, p. 2363–2376, 2021.

CARMEN & DANIELA. Textile organic dyes – Characteristics, polluting effects and separation/elimination procedures from industrial effluents – **A Critical Overview. organic pollutants ten years after the stockholm convention - environmental and analytical update**, 2012.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução nº237, de 19 de dezembro de 1997. Licenciamento ambiental; competência da União, Estados e Municípios; listagem de atividades sujeitas ao licenciamento; **Estudos Ambientais, Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental**,1997.

ELGARAHY *et al.*, A critical review of biosorption of dyes, heavy metals and metalloids from wastewater as an efficient and green process. **Cleaner Engineering and Technology**. V. 4. 2021.

GLEBA *et al.*, Multidisciplinary investigation reveals the earliest textiles and cinnabar-coloured cloth in Iberian Peninsula. **Scientific Reports** (Springer Science and Business Media LLC)-Vol. 11, Iss: 1, pp 21918. 2021.

JUCKPECH, PINYAKONG, RERNGSAMRAN. Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by newly isolated *Curvularia* sp. F18, *Lentinus* sp. S5, and *Phanerochaete* sp. T20. **Scienceasia**-Vol. 38, Iss: 2, pp 147. 2011.

KAUSHIK & MALIK. Fungal dye decolourization: recent advances and future potential. **Environ Int.** 35(1):127-41. 2009.

KISHOR *et al.*, Ecotoxicological and health concerns of persistent coloring pollutants of textile industry wastewater and treatment approaches for environmental safety. **Journal of Environmental Chemical Engineering**. Volume 9, Issue 2, April, 105012. 2021.

KUMARIL & KUMA. **Bioinformatics and computational tools in bioremediation and biodegradation of environmental pollutants.** pp 421-444. 2020.

LELLIS *et al.*, Effects of textile dyes on health and the environment and bioremediation potential of living organisms. **Biotechnology Research and Innovation**, v. 3, n. 2, p 275-290, 2019.

LIRA *et al.*, Filamentous fungi from textile effluent and their potential application for bioremediation process. **Microbiology An. Acad. Bras. Ciênc**, v. 94, n. 2, 2022.

O'HAIRE, T., & GOSWAMI, P. Fibers and filaments. In T. Cassidy, & P. Goswami (Eds.), **Textile and Clothing Design Technology**, p. 5-25, 2018.

PANDA *et al.*, Sustainable pretreatments in textile wet processing. **Journal of Cleaner Production**, v.329, n. 20, p. 129725, 2021.

PRZYSTAŚ, ZABŁOCKA-GODLEWSKA & GRABIŃSKA-SOTA. Efficiency of decolorization of different dyes using fungal biomass immobilized on different solid supports. **Environmental Microbiology, Short Communication. Braz. J. Microbiol**, v. 49, n. 2, 2018.

RUSTAMJONOVICH. The role of textile industry in modern economy. international **Journal of Education, Social Science & Humanities. Finland Academic Research Science Publishers.** v. 11. n. 5, 2023.

ROOS *et al.*, Environmental assessment of Swedish clothing consumption – six garments, sustainable futures. **Technical Report**, 2019.

SEM *et al.*, Fungal decolouration and degradation of azo dyes: A review. **Fungal Biology Reviews.** v. 30, 2016.

SHEAM *et al.*, Mycoremediation of reactive red HE7B dye by *Aspergillus salinarus* isolated from textile effluents. **Curr Res Microb Sci. Dec**, v. 2, p. 100056, 2021.

SHOURIE & VIJAYALAKSHMI. Fungal Diversity and Its Role in Mycoremediation. **Geomicrobiology journal**, v. 39, n.3, p. 426-444, 2022.

VARJANI & UPASANI. Biodegradation of petroleum hydrocarbons by oleophilic strain of *Pseudomonas aeruginosa* NCIM 5514. **Biore-source Technology**, v. 222, p. 195-201, 2016.

World Trade Organization. WTO. **World Trade Statistical Review 2022**, 2022.

YASEEN & SCHOLZ. Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 16, p. 1193–1226, 2019.

ÍNDICE REMISSIVO

I

Indústria 16, 18, 20, 21, 28, 56, 58, 61, 76, 78, 80, 85, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 106, 108, 109

Industrial 14, 15, 16, 17, 18, 19, 22, 23, 24, 25, 27, 28, 29, 57, 58, 59, 91, 93, 94, 98, 100, 104, 109, 110

M

Microrganismos 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 26, 28, 32, 37, 38, 40, 41, 42, 56, 58, 60, 63, 64, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 88, 89, 90, 99, 107, 109

P

Produção 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 24, 26, 27, 32, 35, 36, 42, 51, 52, 56, 58, 59, 60, 76, 77, 78, 79, 81, 82, 83, 84, 85, 88, 89, 90, 98, 100, 101, 102

Produtos 14, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 33, 34, 35, 36, 38, 47, 52, 55, 58, 59, 61, 77, 81, 82, 84, 89, 98, 101, 103, 104

R

Resíduos 14, 15, 16, 18, 21, 23, 24, 28, 32, 55, 58, 59, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 92, 94, 106

Biotecnologia microbiana e suas aplicações no meio ambiente

A Biotecnologia Microbiana oferece soluções para desafios complexos no campo da preservação ambiental. Com entusiasmo, apresentamos o livro “Biotecnologia Microbiana: E Suas Aplicações no Meio Ambiente,” uma obra que mergulha profundamente no mundo dos microrganismos e revela o impacto transformador que eles têm em nosso planeta.

Este livro representa uma jornada emocionante pelo reino microbiano, explorando as inúmeras maneiras pelas quais os microrganismos podem ser utilizados para melhorar nossa qualidade de vida e proteger o ambiente que nos cerca. Uma parte significativa do livro é dedicada a explorar como os microrganismos podem ser usados para mitigar problemas ambientais urgentes, incluindo a biorremediação de poluentes e a promoção da agricultura sustentável. A obra é resultado da colaboração de especialistas e pesquisadores renomados que compartilham suas perspectivas e experiências, tornando-a uma fonte confiável e abrangente de conhecimento.

Organizadores

RFB Editora
CNPJ: 39.242.488/0001-07
Home Page: www.rfbeditora.com
Email: adm@rfbeditora.com
Telefone: 91988857730
Belém, Pará, Brasil

