Bioenergia em Revista: Diálogos

ano 15/vol. 15 | n. 1| jan. 2025 /jun. 2025 | ISSN: 2236-9171

Bioenergia em Revista: Diálogos

ISSN: 2236-9171
Bioenergia em Revista: Diálogos | publicação semestral | Piracicaba
ano 15/vol. 15 | n. 1| jan. / jun. 2025

Governador do Estado de São Paulo
Tarcísio de Freitas

Secretário de Ciência, Tecnologia e Inovação
Vahan Agopyan

Diretor Superintendente do Centro "Paula Souza"
Clóvis Dias

Diretor do CESU
Robson dos Santos

Diretor da Faculdade de Tecnologia de Piracicaba Dep. "Roque Trevisan"
José Alberto Florentino Rodrigues Filho

Editoria
Filomena Maria Formaggio

Editores de Seção

Filomena Maria Formaggio – Fatec Piracicaba
Luis Fernando Sanglade Marchiori – ESALQ-USP e Fatec Piracicaba
Paulo Cesar Doimo Mendes – Fatecs de Piracicaba e Itapetininga, EEP
Fabio Augusto Pacano – Fatec Piracicaba, CNEC Capivari-SP
Luciana Fischer – Fatec Piracicaba e PUCCampinas-SP
Érika Gutierrez – Fatec Piracicaba
Angela de F. Kanesaki Correia – Fatec Piracicaba, UNIMEP
Mauricio D. C. Pinheiro – Fatec Piracicaba

Comissão Editorial

Filomena Maria Formaggio - Fatec Piracicaba
Vanessa de Cillos Silva - Fatec Piracicaba
Paulo Cesar Doimo Mendes - Fatec Piracicaba
Marcia Nalesso Costa Jordão Medina - Fatec Piracicaba
Fabio Augusto Pacano - Fatec Piracicaba
Maria Helena Bernardo – Fatec Piracicaba
Amanda Andrade Vilela da Silva – Fatec Piracicaba

Bioenergia em Revista: Diálogos • Rua Diácono Jair de Oliveira, 651 • Bairro Santa Rosa
CEP: 13.414-155 • Piracicaba / SP • Telefone: [+55 19] 3413-1702
e-mail: bionergia.r.dialogos@gmail.com
www.fatecpiracicaba.edu.br/revista

Conselho Editorial

José Alberto Florentino Rodrigues Filho – Fatec Piracicaba
Daniela Russo Leite – Fatec Araraquara
Gisele Gonçalves Bortoleto - Fatec Piracicaba
Eliana Maria G. Rodrigues – Fatec Piracicaba
Daniela Defavari do Nascimento – Fatec Piracicaba
Regina Movio de Lara –IESCAMP/SP
Siu Mui Tsai Saito - Cena – USP
Raffaella Rossetto - APTA - polo regional Centro-Sul
Ada Camolesi - FIMI Mogi Mirim
Marly T. Pereira - ESALQ-USP
Vitor Machado – UNESP Bauru
Adolfo Castillo Moran - Cordoba, Ver. Mexico
Gregorio M. Katz - San Miguel de Tucuman Argentina
Guilherme A. Malagolli - Fatec Taquaritinga
Murilo Melo - ESALQ-USP
Angelo Luis Bortolazzo – Centro Paula Souza
Jorge Corbera Gorotiza - San Jose de Las Lajas - La Habana - Cuba

Bioenergia em Revista: Diálogos (ISSN 2236-9171) é uma publicação eletrônica semestral vinculada a Faculdade de Tecnologia de Piracicaba "Dep. Roque Trevisan".

Objetivo: publicar estudos inéditos, na forma de artigos e resenhas, nacionais e internacionais, que contribuam ao debate acadêmico-científico, além de estimular a produção acadêmica nos níveis da graduação e pós-graduação.

Os artigos são de responsabilidade exclusiva dos autores. É permitida sua reprodução, total ou parcial, desde que seja citada a fonte.

Bioenergia em Revista: Diálogos / Fatec - Faculdade de Tecnologia de Piracicaba /
Faculdade de Tecnologia de Araçatuba. - - Piracicaba / Araçatuba, SP: a Instituição, desde 2011.
v. Semestral - ISSN 2236-9171
1. Ciências Aplicadas / Tecnologia- periódico I.
Bioenergia em Revista: Diálogos II. Fatec -
Faculdade de Tecnologia de Piracicaba "Dep. Roque Trevisan" / Faculdade de Tecnologia de Araçatuba

Bioenergia em Revista: Diálogos • Rua Diácono Jair de Oliveira, 651 • Bairro Santa Rosa
CEP: 13.414-155 • Piracicaba / SP • Telefone: [+55 19] 3413-1702
E-mail: bionergia.r.dialogos@gmail.com
www.fatecpiracicaba.edu.br/revista

Sumário

06 Apresentação

07 Chamada de Artigos

08 **Efeito da adubação nitrogenada na qualidade e produtividade da cana energia em comparação à matéria-prima açucarada**

SILVA, Fabio César da; SANTOS, Jennifer Thamara Conceição; CARVALHO, Sânida Santos de; MARCHIORI, Luis Fernando Sanglade; LIENDO SILVA, Gael Silvia Penaranda; ABREU JUNIOR, Cassio Hamilton

36 **Cultivo e multiplicação "in vitro" de sorgo**

NOGUEIRA, Tainá Caroline; NASCIMENTO, Daniela Defavari do

51 **Avaliação de sustentabilidade de alternativas da utilização da vinhaça**

OLIVEIRA, Nélio de; RAMOS, Kelly da Silva; SILVA, Fábio César da

70 **Soro de leite: aplicação das proteínas como filmes comestíveis**

MARQUES, Tadeu Alcides; RAMALHO, Pedro Henrique Paes; REZENDE NETO, Dionísio; MEDINA, Marcia Nalesso Costa Jordão

92 **Determinação de açúcares fermentáveis em amostras de *Pinus sp.*, Mandioca e cascas e farelo de soja como possibilidade para produção de bioetanol**

VELOSO, Jhonatan Marques; DETOGNI, Maxsuillian Raimundo; BATISTA, Silvia Letícia da Fonseca; BRANDL, Cândida; GIUSTI, Edneia Durli; AQUINO, Lucas Emanoel do Nascimento; GOMES, Sandra Inês Adams Angnes

110 Produção de biodiesel a partir de resíduos agropecuários e industriais – uma alternativa sustentável

HONÓRIO, Glaucio Gualtieri

134 Produção de biogás através de esgoto urbano

OLIVEIRA, Luana Bolivio de; SILVA, Mariana Colletti da; MAZZONETTO, Alexandre Witier

153 Uso de antimicrobianos naturais na produção de etanol: uma alternativa sustentável para o controle microbiológico

COLI, Dirlei Augusto de Oliveira; PRADA, Marcos Henrique

170 Recuperação de invertase através do sistema de duas fases aquosas

RODRIGUES, Eliana Maria Gonçalves

Apresentação

Bioenergia em Revista: Diálogos, publicação da Faculdade de Tecnologia de Piracicaba Dep. "Roque Trevisan" oferece à comunidade acadêmico-científica mais um número objetivando a apresentação e discussão de temas atinentes à pesquisa, inovação e ao diálogo com todas as áreas do conhecimento, elementos imprescindíveis e constituidores à formação científico-tecnológica.

A Revista está classificada como B4 no sistema Qualis/CAPES e encontra-se associada aos indexadores Latindex, IBICT, Sumários.org e CNEN60.

A presente edição conta com as seções de *AGRONOMIA* e apresenta os artigos *Efeito da adubação nitrogenada na qualidade e produtividade da cana energia em comparação à matéria-prima açucarada; Cultivo e multiplicação "in vitro" de sorgo e, Avaliação de sustentabilidade de alternativas da utilização da vinhaça.*

A seção *ALIMENTOS* apresenta o artigo *Soro de leite: aplicação das proteínas como filmes comestíveis.*

A seção de *ENERGIA* apresenta os artigos *Determinação de açúcares fermentáveis em amostras de Pinus sp., Mandioca e cascas e farelo de soja como possibilidade para produção de bioetanol; Produção de biodiesel a partir de resíduos agropecuários e industriais – uma alternativa sustentável; Produção de biogás através de esgoto urbano; Uso de antimicrobianos naturais na produção de etanol: uma alternativa sustentável para o controle microbiológico e, Recuperação de invertase através do sistema de duas fases aquosas.*

Ressalte-se que um dos nossos objetivos é a disseminação do conhecimento. Para tanto, o periódico Bioenergia em Revista: Diálogos possui inserção nacional e internacional e conta com a participação de pesquisadores de diversas instituições de ensino e pesquisa. O recebimento dos artigos é pelo sistema de fluxo contínuo e a periodicidade é semestral.

Chamada de artigos

A Revista Bioenergia em Revista: Diálogos convida pesquisadores, docentes e demais interessados das áreas de Bioenergia, Gestão Empresarial, Agroindústria, Alimentos e áreas afins, a colaborarem com artigos científicos, de revisão e/ou resenhas para a próxima edição deste periódico.

As normas de submissão e análise estão disponíveis em nosso site – **www.fatecpiracicaba.edu.br/revista**. Os trabalhos serão recebidos por via eletrônica em fluxo contínuo, e os autores poderão acompanhar o progresso de sua submissão através do sistema eletrônico da revista.

Os dados apresentados, bem como a organização do texto em termos de formulação e encadeamento dos enunciados, das regras de funcionamento da escrita, das versões em língua **inglesa e espanhola** dos respectivos resumos, bem como o respeito às Normas da ABNT são de **inteira responsabilidade dos articulistas**.

Efeito da adubação nitrogenada na qualidade e produtividade da cana energia em comparação à matéria-prima açucarada

SILVA, Fábio César da;
SANTOS, Jennifer Thamara Conceição;
CARVALHO, Sânida Santos de;
MARCHIORI, Luis Fernando Sanglade.
LIENDO SILVA, Gael Silvia Penaranda
ABREU JUNIOR, Cassio Hamilton

Resumo

A cana-de-açúcar é uma cultura de grande importância econômica para o Brasil, sendo utilizada principalmente na produção de açúcar, etanol e energia elétrica. A cana energia, também conhecida como cana-de-açúcar para bioenergia, é uma variedade específica de cana que apresenta alto teor de biomassa e pode ser utilizada como fonte de energia renovável, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a diversificação da matriz energética. Nessa circunstância, o uso adequado da adubação nitrogenada na produção da cana energia pode ser fundamental para a maximização da produtividade da cultura e, consequentemente, para a melhoria da rentabilidade dos produtores e da competitividade do setor sucroenergético brasileiro. O estudo foi conduzido em campo, na Usina Granelli, em Ipeúna-SP, em solo Argissolo de textura arenosa. Os tratamentos principais consistiam em três variedades de cana-de-açúcar que receberam quatro doses de nitrogênio na forma de ureia e nitrato de amônia. Para avaliar a resposta das variedades à adubação nitrogenada, foram medidos o acúmulo de matéria seca, a taxa de produção de matéria seca e a taxa de crescimento relativo em relação aos níveis de nitrogênio. Outros parâmetros avaliados incluíram teor de fibra, açúcares totais recuperáveis, Brix e pol. O experimento foi realizado em blocos casualizados com parcelas subdivididas e quatro repetições. As parcelas foram constituídas de 4 linhas de 10,5 m de comprimento com espaçamento entrelinhas de 1,5 m.

Palavras-chave: cana-de-açúcar, cana energia, nitrogênio.

Summary

Sugarcane is a crop of great economic importance for Brazil, being used mainly in the production of sugar, ethanol and electricity. Energy cane, also known as bioenergy sugar cane, is a specific variety of sugar cane that has a high biomass content and can be used as a source of renewable energy, contributing to the reduction of greenhouse gas emissions and the diversification of the energy matrix. In this circumstance, the appropriate use of nitrogen fertilizer in the production of energy cane can be fundamental for maximizing the productivity of the crop and, consequently, for improving the profitability of producers and the competitiveness of the Brazilian sugar-energy sector. The study was conducted in the field, at the Granelli Plant, in Ipeúna-SP, in Argisol soil with a sandy texture. The main treatments consisted of three varieties of sugar cane that received four doses of nitrogen in the form of urea and ammonium nitrate. To evaluate the response of varieties to nitrogen fertilization, dry matter accumulation, dry matter production rate and relative growth rate in relation to nitrogen levels were measured. Other parameters evaluated included fiber content, total recoverable sugars, Brix and pol. The experiment was carried out in randomized blocks with split plots and four replications. The plots consisted of four rows of 10.5 m in length with a row spacing of 1.5 m.

Key works: sugarcane, cane fiber, nitrogen.

Resumen

La caña de azúcar es un cultivo de gran importancia económica para Brasil, siendo utilizada principalmente en la producción de azúcar, etanol y electricidad. La caña energética, también conocida como caña de azúcar para bioenergía, es una variedad específica de caña de azúcar que tiene un alto contenido de biomasa y puede ser utilizada como fuente de energía renovable, contribuyendo a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y a la diversificación de la matriz energética.
En esta circunstancia, el uso adecuado de la fertilización nitrogenada en la producción de caña energética puede ser fundamental para maximizar la productividad del cultivo y, en consecuencia, mejorar la rentabilidad de productores y la competitividad del sector sucroenergético brasileño. El estudio se llevó a cabo en el campo, en la Usina Granelli, en Ipeúna-SP, en un suelo Argisol con textura arenosa. Los principales tratamientos consistían en tres variedades de caña de azúcar que recibieron cuatro dosis de nitrógeno en forma de urea y nitrato de amonio. Para evaluar la respuesta de las variedades a la fertilización nitrogenada, se midió la producción de materia seca acumulada, la tasa de producción de materia seca y la tasa de crecimiento relativa en relación con los niveles de nitrógeno. Otros parámetros evaluados incluyeron contenido de fibra, azúcares recuperables totales, Brix y pol. El experimento se llevó a cabo en bloques al azar con parcelas subdivididas y cuatro repeticiones. las parcelas consistieron en 4 hileras de 10,5 m de largo con 1,5 m de espacio entre hileras.

Palabras-Clave: caña de azúcar, caña energética, nitrógeno.

INTRODUÇÃO

A intensificação do consumo energético mundial - sobretudo a partir da revolução industrial, quando se iniciaram os avanços tecnológicos da indústria, do comércio, e da agricultura - revela a urgência em se ampliar a capacidade de produção e eficiência energética dos sistemas produtivos para atender a alta demanda.

No período compreendido entre 2018 e 2019, a utilização de energia elétrica nos 10 maiores países do mundo aumentou 4,4%, conforme dados do U.S. Energy Administration (EIA). No Brasil, especificamente, durante o período de 2020 e 2021 o consumo foi elevado em 22,9%, segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) da EPE. Já em relação aos combustíveis, no período de 2000 a 2022, as vendas de gasolina cresceram 87% e de diesel 81%, de acordo com dados do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP, 2023).

Embora haja predomínio da utilização de matrizes energéticas de origem fóssil, como carvão mineral, gás natural e petróleo, a demanda por matrizes de fonte vegetal, isto é, que se regeneram mais rápido e emitem menos gases de efeito estufa, tem ganhado cada vez mais destaque no setor energético para obtenção de biorrefinaria verde e sustentável.

No Brasil, as fontes renováveis presentes na matriz energética são: biomassa de cana, hidráulica, solar, eólica, carvão vegetal, entre outras. A biomassa de cana-de-açúcar é a principal matéria-prima utilizada para a produção de energia líquida, um biocombustível alternativo aos que são produzidos através de material fóssil. De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP), no período de 2000 a 2022, as vendas de etanol hidratado cresceram 238% no país. Além disso, essa biomassa é utilizada na produção de energia elétrica por meio da cogeração do bagaço e uso racional de água, embora seja quantitativamente menor em comparação a outros tipos de matéria-prima. Por conseguinte, crescem as pesquisas que objetivam o aumento do teor e qualidade energética da cana-de-açúcar.

A cana-energia ou cana fibra, por exemplo, é uma planta convencional selecionada pelo melhoramento vegetal, a qual é eficiente energeticamente, seja para aplicação na fabricação de biocombustível, bioquímicos ou geração de energia renovável. É classificada em duas variedades principais, a tipo I, que apresenta em torno de 13% de açúcar e 17% de fibras, e a tipo II que possui cerca de 30% de fibra e 6% de açúcar. Já a cana convencional contém 12% de fibras e 13% de açúcar (Oliveira, 2022). Por possuir fácil adaptabilidade a solos com baixa fertilidade e maior

resistência, sendo possível realizar dez cortes em uma mesma lavoura, além de alto teor de fibra, o interesse nessas variedades tem aumentado, sendo necessário maior aprofundamento sobre as características de desenvolvimento e potencial energético delas.

O bom desenvolvimento da planta depende de diversos fatores, em especial da disponibilidade de nutrientes no solo, o que possibilita que a cultura tenha uma formação adequada. Em casos em que há ausência destes, é necessário a adição, por meio de insumos químicos. O nitrogênio, por exemplo, é um nutriente imprescindível na cultura da cana-de-açúcar, posto que exerce um papel estrutural fundamental no metabolismo da planta, compondo inúmeras moléculas essenciais.

Diante disto, este trabalho teve como objetivo analisar a resposta das variedades de cana energia tipo 1 e tipo 2 à adubação nitrogenada, comparando-as com o rendimento da cana convencional, e avaliando o acúmulo de matéria seca.

REVISÃO DE LITERATURA

Cana-de-Açúcar

A cana-de-açúcar é uma gramínea monocotiledônea semi-perene pertencente ao gênero Saccharum, família da Poáceas. Embora haja várias suposições em relação ao seu local de origem, há um consenso entre os pesquisadores de que tenha sido entre o sudeste asiático e o norte da Oceania (Silva, 2024; Marin, 2014). A planta possui dois ciclos, o primeiro é denominado cana-planta, onde ainda não foi realizado o primeiro corte, o qual ocorrerá em torno de 12 a 18 meses após plantio, dependendo do cultivar. O segundo é chamado cana-soca, neste, o período de corte será exatamente 12 meses após o primeiro, ainda que a área cultivada revele talhões de diferentes variedades genéticas (Gasqui, 2018). A qualidade da cana-de-açúcar é determinada por alguns parâmetros tecnológicos, são eles: i) POL (teor de sacarose presente na cana): é definido por meio da multiplicação da produtividade de colmos pelo percentual de POL da cana, caracterizado pela massa de sacarose existente em uma solução; BRIX: equivale a porcentagem de sólidos solúveis presentes em uma solução de sacarose; ii) ATR: é a quantidade de açúcares, monossacarídeos, glicose e frutose que não foram transformados em sacarose (União dos Produtores de Bionergia - UDOP, 2016; Gasqui, 2018).

As cultivares conhecidas atualmente são, em sua maioria, híbridos obtidos por cruzamentos, mesclando características favoráveis das diversas espécies (Coelho, 2015).

Cultivada em regiões tropicais e subtropicais, a planta foi incorporada no solo brasileiro no período colonial, e como consequência da excelente adaptação ao clima e ao potencial produtivo, se expandiu pelo país se tornando uma das principais culturas da economia, principalmente no Estado de São Paulo (Raveli, 2013). De acordo com Silva (2024), a cana-de-açúcar cultivada no país é um híbrido das espécies *Saccharum officinarum; Saccharum barberi; Saccharum robustum; Saccharum spontaneum; Saccharum sinensis; Saccharum edule.*

Nacionalmente, a planta é utilizada na agroindústria para produção de açúcar, álcool e etanol de segunda geração, sendo o Brasil um dos países líderes na produção de biocombustíveis a base de cana-de-açúcar. Para mais, os subprodutos e resíduos são empregados na cogeração de energia elétrica, fabricação de ração animal e fertilizante para lavouras (Silva, 2024; EMBRAPA, 2022).

Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) (2022), o Brasil é o maior produtor em contexto mundial, compreendendo mais de sete milhões de hectares plantados e produzindo mais de 480 milhões de toneladas de cana, o colocando em liderança no que diz respeito a tecnologia de produção de etanol. Conforme a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), na safra 2021/22, a produção totalizou 585,2 milhões de toneladas, a área colhida alcançou 8.317 mil hectares, e a produtividade média ficou em 70.357 kg/ha. Para o ciclo 2022/2023 a previsão de produção é de 598,3 milhões de toneladas e produtividade de 72.026 kg/ha, 3,9% superior à obtida na temporada 2021/22.

Para certificar a rentabilidade ao setor sucroalcooleiro é fundamental obter alta produtividade e qualidade da cana-de-açúcar. O melhoramento genético é um dos principais fatores agronômicos que podem contribuir com a amplificação da produtividade, podendo desenvolver variedades que se adaptam melhor às condições adversas de solo e clima. (Matsuoka, 2014).

Conforme Rosseto (2022), para que o Brasil se mantenha em destaque mundial no mercado de biocombustíveis, é importante o desenvolvimento de pesquisas no setor sucroalcooleiro, principalmente nas seguintes áreas:

- Produção agrícola: objetivando o aumento de produtividade da cana-de-açúcar, através de melhoramento genético, manejo, tratos culturais e desenvolvimento de máquinas.
- Produção industrial: enfatizando a melhoria na gestão empresarial das usinas e a eficiência da produção de açúcar e etanol, com equipamentos mais eficazes nos processos de fabricação.

- Desenvolvimento de novos produtos: produção de matéria-prima para indústrias do setor de alcoolquímica, energia e alimentícia.

Cana-energia

O melhoramento genético da cana-de-açúcar foi por um longo período direcionado essencialmente ao aumento do teor de sacarose, com o intuito de reduzir as emissões de gases do efeito estufa. Entretanto, o setor de biocombustíveis e bioenergia vêm explorando gradativamente o desenvolvimento de híbridos ricos em biomassa lignocelulósica e com potencial produtivo de etanol e energia (Oliveira, 2022).

Novos estudos estão direcionando o melhoramento para a acumulação de fibra - material composto de 32 a 48% de celulose, 19 a 24% de hemicelulose, 23 a 32% de lignina e uma pequena quantidade de cinzas e extrativos - tendo em vista que, ao se priorizar esse tipo de produção, as plantas se tornam mais rústicas, menos exigentes em relação ao solo, clima, água e nutrientes. Além disso, são mais resistentes a pragas e doenças, resultando em maior eficiência energética no seu cultivo, isto é, maior unidade de energia produzida por energia gasta (Matsuoka *et al.*, 2012; Ramos, 2015). Dito isto, genótipos denominados de cana-energia oriundos em sua maioria da espécie *Saccharum spontaneum* L. têm ganhado destaque nas pesquisas (Oliveira, 2022).

De maneira oposta à cana de açúcar convencional, a cana energia é composta de alta fibra e menor produção de sacarose (Mariano, 2019). Para mais, de acordo com Okuno (2016) ela possui menor espessura, maior taxa de crescimento, maior resistência à seca e maior número de cortes das soqueiras, tendo em vista que a cana-de-açúcar suporta cerca de 5-8 cortes entre os períodos de renovação da planta até o fim da vida útil. Já a cana-energia atinge até 15 cortes, com longevidade muito superior, vale ressaltar que esta é uma característica comercial considerável (Okuno, 2016; Andrade, 2021). De acordo com Valadão (2019) e Mariano (2019), a cana-energia pode ser classificada em duas categorias:

- Tipo I: apresenta médio nível de açúcar, acima de 13% de sacarose e alto teor de fibra, entre 14 e 18%. Essa variedade tem melhor aplicabilidade na indústria de etanol, já que ela pode aumentar a produtividade de açúcar por hectare, consequentemente, contribui na redução dos custos de produção.

- Tipo II: expressa baixo nível de açúcar, (sacarose menor que 6%) e elevado nível de fibra, podendo ser acima de 28%. Essa variedade, deve ser utilizada nas indústrias que

fazem uso da biomassa na produção de etanol e bioquímicos de segunda geração, biogás e biometano, eletricidade e siderurgia, por exemplo.

Bioeletricidade

A cana-de-açúcar é uma cultura muito eficaz na conversão de energia química (Ramos, 2015). Aproximadamente 15% do peso de cada colmo adulto é composto por palha, folhas e ponteiras e 40% desse resíduo não é usado na cogeração de energia. Os resíduos que ficam no campo após a colheita podem ser conduzidos para a combustão e conversão de energia elétrica ou na conversão em bioetanol, por meio da tecnologia de digestão da celulose ou bioóleo via pirólise da biomassa (Carvalho-Netto *et al*, 2014).

De acordo com um levantamento realizado pela União da Indústria de Cana-de-Açúcar (Unica), por meio de dados da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, 4% da energia elétrica produzida no Brasil para a rede em 2021 foi gerada pela bioeletricidade. O setor sucroenergético representa 79,5% deste total, tendo sido gerado 20,2 mil Gwh. (UNICA, 2021).

Neste mesmo ano, apenas 60% das 369 usinas de açúcar e etanol em atuação no país ofertaram o excedente em energia elétrica. Caso todas as usinas produzissem energia, o total ofertado à rede elétrica poderia alcançar 151 mil Gwh, cerca de 26% do consumo energético anual do país, de acordo com os cálculos da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022).

No ano de 2022, a fonte biomassa apresentou 16.771 MW em potência, com 615 centrais geradoras, representando 9% da matriz elétrica brasileira (186.871 MW). A potência da biomassa sólida da cana-de-açúcar apresentou 12.060 MW (72% da fonte biomassa em geral), com 415 centrais geradoras, enquanto o biogás agroindustrial tem potencial energético de 31,9 MW com apenas quatro centrais geradoras (ANEEL, 2022).

De acordo com um levantamento realizado pela União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA), por meio de dados da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, 4% da energia elétrica produzida no Brasil para a rede em 2021 foi gerada pela bioeletricidade. O setor sucroenergético representa 79,5% deste total, tendo sido gerado 20,2 mil Gwh (UNICA, 2021).

Neste mesmo ano, apenas 60% das 369 usinas de açúcar e etanol em atuação no país ofertaram o excedente em energia elétrica. Caso todas as usinas produzissem energia, o total ofertado à rede elétrica poderia alcançar 151 mil Gwh, cerca de 26% do consumo energético anual do país, de acordo com os cálculos da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022).

Nitrogênio

O nitrogênio (N) é um nutriente mineral muito exigido pelas plantas, porquanto possui moléculas fundamentais para a estrutura e fisiologia vegetal desde a base da vida, ou seja, na composição dos ácidos nucleicos (DNA e RNA), aminoácidos, proteínas, e outras moléculas essenciais à vida, como a clorofila (Meyer *et al*, 2022). Na cultura da cana-de-açúcar, o N absorvido eleva a atividade meristemática da parte aérea, o que provoca maior perfilhamento, índice de área folear e a conservação da mesma (Oliveira *et al*, 2018).

Conforme Silva (2014), na natureza, o nitrogênio pode ser dividido em duas categorias: não reativo e reativo. O formato não reativo, envolve a forma diatômica do nitrogênio (N_2), enquanto no formato reativo caracterizam-se todas as formas de nitrogênio ativos biologicamente, fotossinteticamente e radioativamente. Esta última classe, subdivide-se em outros dois grupos, sendo eles:

i. Componentes inorgânicos reduzidos - amônia (NH_3+), amônio (NH_4+) - e componentes inorgânicos oxidados - óxido de nitrogênio (NOx), ácido nítrico (HNO_3), óxido nitroso (N_2O) e nitrato (NO_3);
ii. Componentes orgânicos: ureia, aminas, aminoácidos, proteínas e ácidos nucléicos.

No ambiente natural, levando em consideração um ciclo simples em que há somente entrada e saída, o nitrogênio reativo só poderá ser produzido através de descargas elétricas ou por fixação biológica (processo realizado por meio de enzimas do tipo nitrogenase) (Galloway, 2003).

O N é introduzido no solo através da aplicação de fertilizantes nitrogenados, da mineralização da matéria orgânica, da fixação biológica e da água das chuvas. Sua presença é determinante para o alcance de alta produtividade (Braos, 2012). Dentre os fertilizantes nitrogenados, a ureia é o mais utilizado no Brasil (66%), seguido do nitrato de amônio (18%) e sulfato de amônio (16%), conforme Moreno (2015). Após ser incorporado ao solo, o nitrogênio fica sujeito a inúmeras transformações químicas e biológicas, como mineralização, nitrificação e imobilização, as quais ocorrem por meio de microrganismos específicos, e que são primordiais na absorção pelos vegetais.

A intensidade e frequência da população microbiana varia em conformidade com alguns fatores, como: clima, tipo e preparo do solo, manejo, composição química e a forma de aplicação dos fertilizantes. Normalmente, a maior parcela de N presente no solo se encontra na matéria

orgânica, configurado em vários tipos de moléculas, com diversos graus de recalcitrância influenciando sua degradação (Fernandes, 2014; Pillon *et al*, 2002).

Em aspecto qualitativo, a escassez de N inibe um bom desenvolvimento da cultura, posto que enzimas responsáveis pelo transporte de açúcares através das membranas não serão sintetizadas (Gasqui, 2018). Conforme Andrade (2021), os principais motivos da carência de N são: remoção pelas plantas, lixiviação, desnitrificação, volatilização superficial e erosão. Em contrapartida, é válido salientar que, assim como a ausência, o excesso deste nutriente impacta a cultura, já que neste caso o N fica acumulado no colmo diminuindo a qualidade do caldo e atrasando a maturação da planta (Miranda *et al*, 2008).

A adubação com N-fertilizante objetiva alongar os entre nós da planta, isto é, aumentar a produtividade e a eficiência de uso do nutriente, tendo em vista as perdas do N da ureia por volatilização de NH_3 e imobilização (Leite, 2011). De acordo com Oliveira *et al* (2018), a ureia é o fertilizante nitrogenado mais empregado na adubação da cana-de-açúcar, principalmente em função do seu menor custo por unidade de N em relação à outras fontes. A aplicação de ureia no solo ou palha pode gerar perdas em razão da volatilização da amônia - em torno de 40% - para tanto, é indicado enterrá-lo no solo a uma profundidade de aproximadamente 7,0 cm. Outra recomendação é a irrigação para incorporá-la ao solo ou fertilizá-lo antes de uma chuva. Caso não haja viabilidade para aplicar alguma dessas alternativas, deve-se escolher fontes amoniacais, tais como sulfato de amônio ou fontes nítricas.

Segundo Rosseto (2008), são extraídos pela parte aérea da cultura cerca de 100kg de N por 100t de colmos na cana-planta e 85kg N por 100t de colmos nas soqueiras. Para Oliveira (2022), a extração de nitrogênio nas variedades mais comuns fica em torno de 1,2 kg por tonelada de matéria natural de brotos, levando em conta que raízes e rizomas equivalem, em média, a 30% da massa da planta inteira, supõe-se absorção de 1,5 kg de N para cada tonelada de matéria natural.

METODOLOGIA

O estudo foi desenvolvido em campo, no município de Ipeúna-SP (latitude 22°26' sul, longitude 47°43' oeste) em área referente à Usina Granelli, na propriedade Bacuri. A realização do experimento se iniciou em 02/10/2018, o solo da área experimental foi identificado como Argissolo de textura arenosa (227 g kg-1 de argila, 30 g kg-1 de silte e 743 g kg-1 de areia, na camada de 20 a 40 cm de profundidade). O delineamento estatístico foi por blocos casualizados com

parcelas subdivididas em quatro repetições, cada subparcela foi constituída de 4 linhas de 10,5 m de comprimento e espaçamento entrelinhas de 1,5 m.

Os tratamentos principais foram representados por três variedades de cana: a) cana energia Tipo I (VG11-4094) ; b) cana energia Tipo II (VG 13) e c) cana-de-açúcar convencional (RB867515, testemunha), os quais receberam quatro doses de nitrogênio diferenciadas, uma para cada subparcela, aplicadas na forma de ureia na primeira soqueira, e posteriormente após segundo corte, como em nitrato de amônia, correspondendo a 0, 50, 100 e 150% da recomendação de N para a cultura da cana convencional (Boletim 100 do Instituto Agronômico IAC). A dose de N a ser aplicada foi sorteada para cada subparcela. No centro das parcelas com doses de N foram instaladas micro parcelas (2 m x 1,5 m totalizando 3 m^2) que receberam a ureia ^{15}N. Para avaliar a resposta das variedades à adubação nitrogenada, foi determinado o rendimento agrícola (acúmulo de matéria seca), no momento da colheita foram avaliadas as plantas contidas nos trechos de seis metros nas três linhas centrais das parcelas, estas foram devidamente pesadas e após, trituradas e do material triturado foram retiradas amostras de 100 g que foram submetidas à secagem em estufas com temperatura controlada (65°C a 70°C), até atingirem peso constante, obtendo-se assim a porcentagem de matéria seca, segundo metodologia de Silva, 2009. Por meio de modelos matemáticos foram estimados: a curva de crescimento da cultura, a taxa de produção de matéria seca (TPMS) e a taxa de crescimento relativo (TCR) em função dos níveis de N. Dentre os parâmetros para fins de comparação destas variedades, também foram avaliadas teor de fibra e açúcares totais recuperáveis (ATR), Brix; e pol.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados foram submetidos a análise variância a fim de verificarem-se as diferenças significativas entre os tratamentos e subtratamentos, aos níveis de significância de 1% e 5%. Posteriormente, as médias foram submetidas ao teste de Tukey para avaliar se as diferenças entre as médias dos tratamentos e subtratamentos foram significativas, aos níveis de significância de 1% e 5%. Na tabela 1, observa-se o resultado da análise de variância, para produtividade por hectare (TCH) em resposta a dosagem de nitrogênio e variedade de cana (Cana Soca), podendo-se afirmar que houve diferença significativa entre as variedades de cana com intervalo de confiança de 5%.

Houve, também, diferença significativa entre os resultados das três variedades de cana: a) cana energia Tipo I (VG11-4094) ; b) cana energia Tipo II (VG 13) e c) cana-de-açúcar

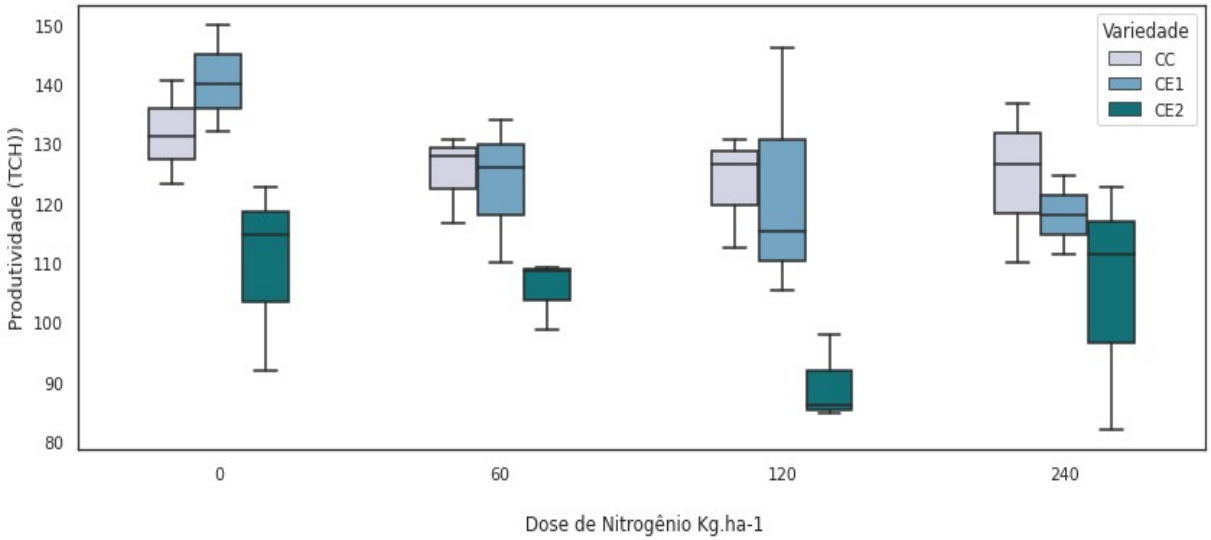
convencional (RB867515, testemunha), e as doses de Nitrogênio, correspondendo a 0, 50, 100 e 150% da recomendação de N para a cultura da cana no intervalo de confiança de 10%.

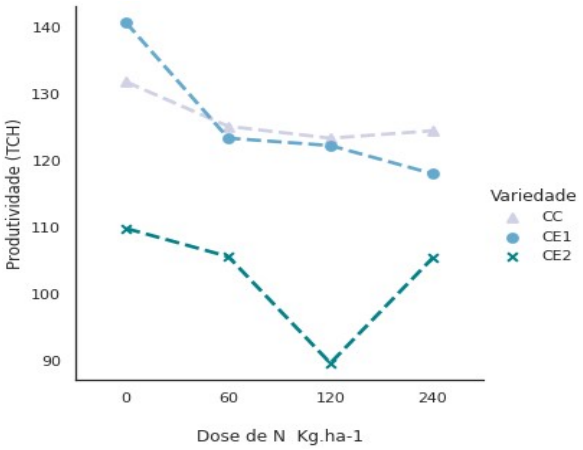
Tabela 1 – Resumo da análise de variância para variável produtividade por hectare (TCH), nas variedades de cana, submetida a diferentes doses de nitrogênio - Cana Soca

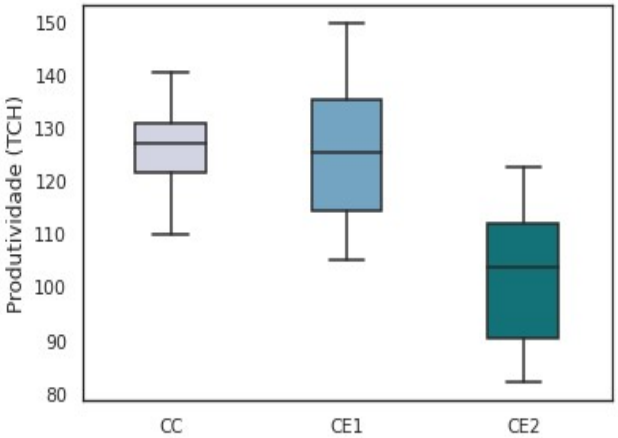
FV	GL	Média Quadrática
Variedade de Cana	2	2219.494**
Dose de N Kg.ha^{-1}	3	396.527*
Variedade de Cana ✻ Dose de N Kg.ha^{-1}	6	92.712**ns**
Resíduos	24	159.049

ns – não significativo. ** e * - significativo a 5% e 10% pelo teste F, respectivamente.

Figura 1 – Gráficos de vela e de linhas mostrando os resultados para variável produtividade por hectare (TCH) em função de doses de N (kg.ha^{-1}), nas variedades de cana - Cana Soca, onde se verifica que as variedades de cana convencional (CC) e energia tipo I (CE1) apresentaram valores superiores com intervalo de confiança menor que 1%







As variedades de cana CC e CE1 apresentaram TCH significativamente superior a variedade CE2 com valor de p <0.001, menor que 1% do intervalo de confiança.

Tabela 2 – Resumo do teste de Tukey analisando a TCH média para variedades de cana – Cana Soca

			95% IC para diferença média		
		Diferença média	**Inferior**	**Superior**	**pTukey**
CC	CE1	0.111	-12.746	12.969	1.000
CC	CE2	23.611	10.754	36.469	<0.001
CE1	CE2	23.500	10.642	36.358	<0.001

p < 0.1, ** p < 0.05, *** p < 0.01

Tabela 3 - Valores médios e totais da produção de matéria seca (MS) de cada variedade de cana – Soca

	TCH		
	CC	**CE1**	**CE2**
Média	126.167[a]	126.056[a]	102.556[b]
Desvio Padrão	9.212	14.615	14.397
Coeficiente de variação	0.073	0.116	0.140
Soma	1.514.000	1.512.667	1.230.667

*[a] Significativo e [b] Não significativo *Coeficiente de variação*

A tabela 3, mostra que a dosagem de Nitrogênio na produtividade por hectare (TCH), as variedades CC e CE1 sem adição de N $kg.ha^{-1}$, apresentaram valores significativamente maiores em produtividade (Figura 2).

Figura 2 – Gráfico de velas mostrando os resultados para variável produtividade por hectare (TCH) com dose de N de 0,0 kg.ha^{-1}, nas variedades de cana - Cana Soca, onde se verifica que as variedades de cana convencional (CC) e energia tipo I (CE1) apresentaram valores significativamente superiores a variedade de cana energia CE2

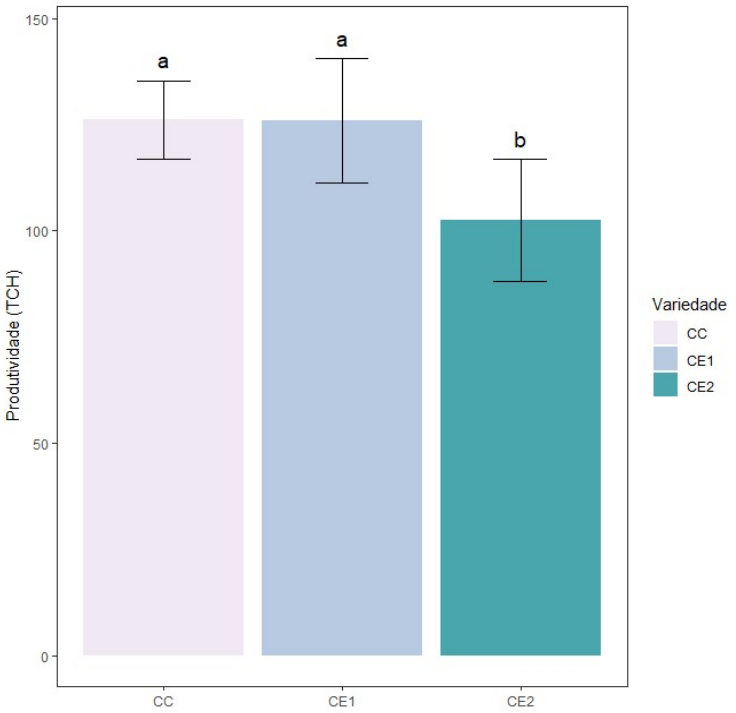
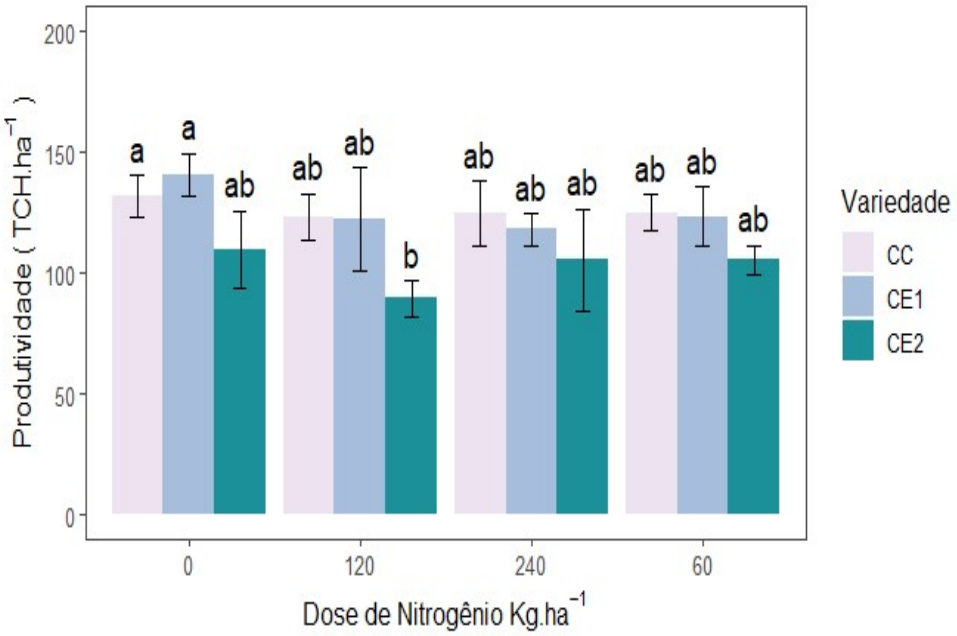


Tabela 4 – Resumo do teste de Tukey analisando a variável variedade de cana em relação e dosagem de N Kg ha-1 significativa, valores médios e somatória da produtividade (TCH) de cada variedade sobre as dosagem de N Kg.ha^{-1} – Cana Soca

Dose de N Kg ha-1	Variedade de Cana	Média	Soma	Tukey
0	CC	131.8	395	a
	CE1	140.7	422	a
	CE2	109.8	329	ab
60	CC	125.1	375	ab
	CE1	123.3	370	ab
	CE2	105.6	317	ab
120	CC	123.3	370	ab
	CE1	122.2	367	ab
	CE2	89.6	269	b
240	CC	124.4	373	ab
	CE1	118.0	354	ab
	CE2	105.3	316	ab

[a] *Significativo* [b] *e* [ab] *Não significativo*

Figura 3 – Gráfico de velas mostrando o resumo dos resultados para variável produtividade por hectare (TCH) em função de todas as doses de N (kg.ha^{-1}), nas variedades de cana CC, CE1 e CE2 - Cana Soca, onde se verifica que as variedades de cana convencional (CC) e energia tipo I (CE1) apresentaram valores significativamente superiores a variedade de cana energia CE2 apenas na dose 0,0 kg.ha^{-1} de N



Resumindo, o tratamento doses de Nitrogênio sobre a produtividade por hectare (TCH), mostrou que as variedades CC e CE1, no tratamento controle - sem adição de N kg.ha^{-1} - obtiveram maior produtividade (Figura 3), como também deixou evidente que nos demais tratamentos (doses correspondendo a 0, 50, 100 e 150% da recomendação de N para a cultura da cana), não houve diferença estatisticamente significativa, nem a 1%, nem a 5%. Na tabela 5, observa-se o resumo da análise de variância da variável Fibra em resposta a dosagem de nitrogênio e variedade de cana (Cana Soca), e pode-se afirmar que houve uma diferença significativa nos resultados para variedade de cana e para dose de Nitrogênio, como também para a interação variedade x dosagem kg ha^{-1}, com intervalo de confiança a 1%.

Tabela 5 – Resumo da análise de variância para variável Fibra, nas variedades de cana, submetida a diferentes doses de nitrogênio - Cana Soca

FV	GL	Média Quadrática
Variedade de Cana	2	124.365**
Dose de N Kg.ha^{-1}	3	23.938**
Variedade de Cana ✻ Dose de N Kg.ha^{-1}	6	10.686**
Resíduos	24	1.988

*^{ns} – não significativo. ** e * - significativo a 1% e 5% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.*

Figura 4 – Gráficos de vela e de linhas mostrando os resultados para variável FIBRA em função de doses de N (kg.ha^{-1}), nas variedades de cana - Cana Soca, onde se verifica que a variedade de cana energia (CE2) apresentou valores superiores com intervalo de confiança a 1%

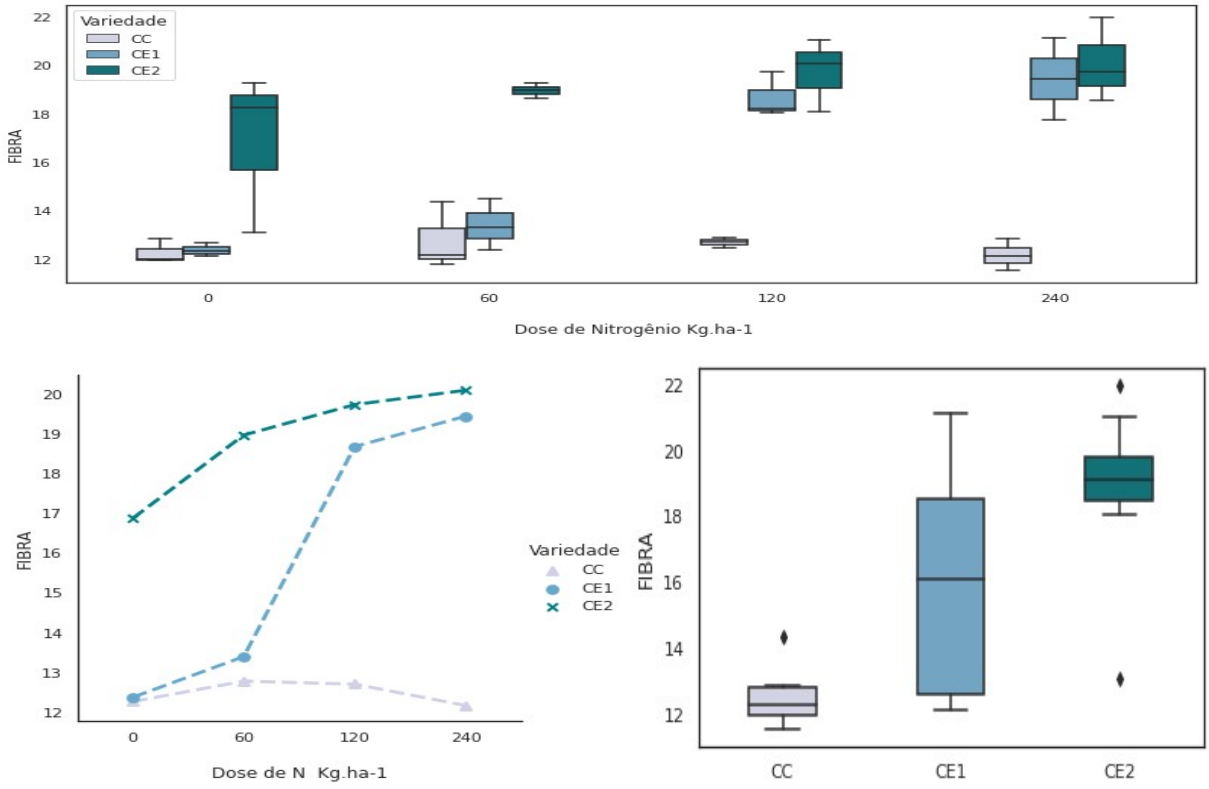


Tabela 6 – Resumo do teste de Tukey analisando a variável variedade de cana – Cana Soca

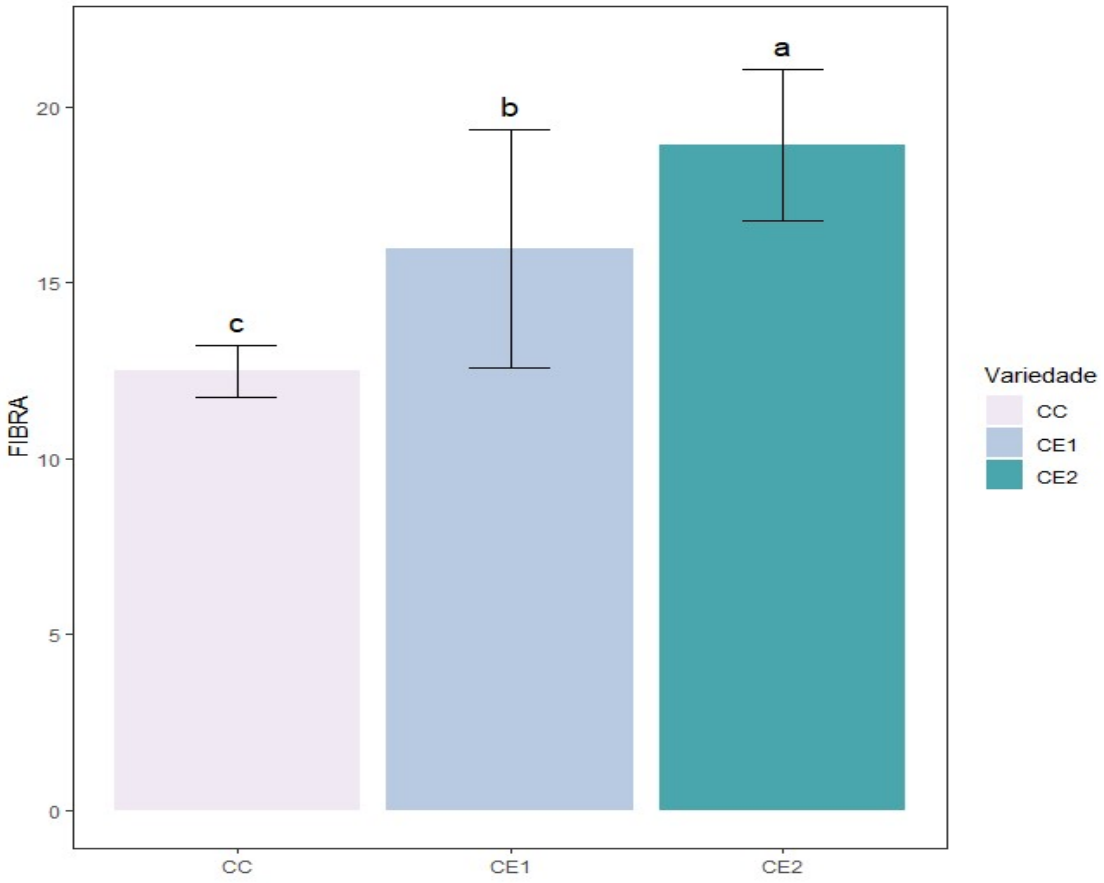
			95% IC para diferença média		
		Diferença média	Inferior	Superior	
CC	CE1	-3.489	-4.927	-2.051	<0.001***
	CE2	-6.431	-7.868	-4,993	<0.001***
CE1	CE2	-2.942	-4.379	-1.504	<0.001**
					p_{tukey}

*** p < .00

Tabela 7 - Média do Fibra de cada variedade de cana - Soca

	FIBRA		
	CC	**CE1**	**CE2**
Média	12.477[c]	15.966[b]	18.907[a]
Desvio Padrão	0.748	3.387	2.160
Coeficiente de variação	0.060	0.212	0.114
Soma	149.720	191.587	226.889

Figura 5 – Gráfico de velas mostrando os resultados para variável FIBRA, onde se verifica que as variedades de cana convencional (CC) e energia tipo I (CE1) apresentaram valores significativamente inferiores a variedade de cana energia CE2, ainda a variedade de cana convencional (CC) apresentou valor significativamente inferior à variedade de cana energia CE1



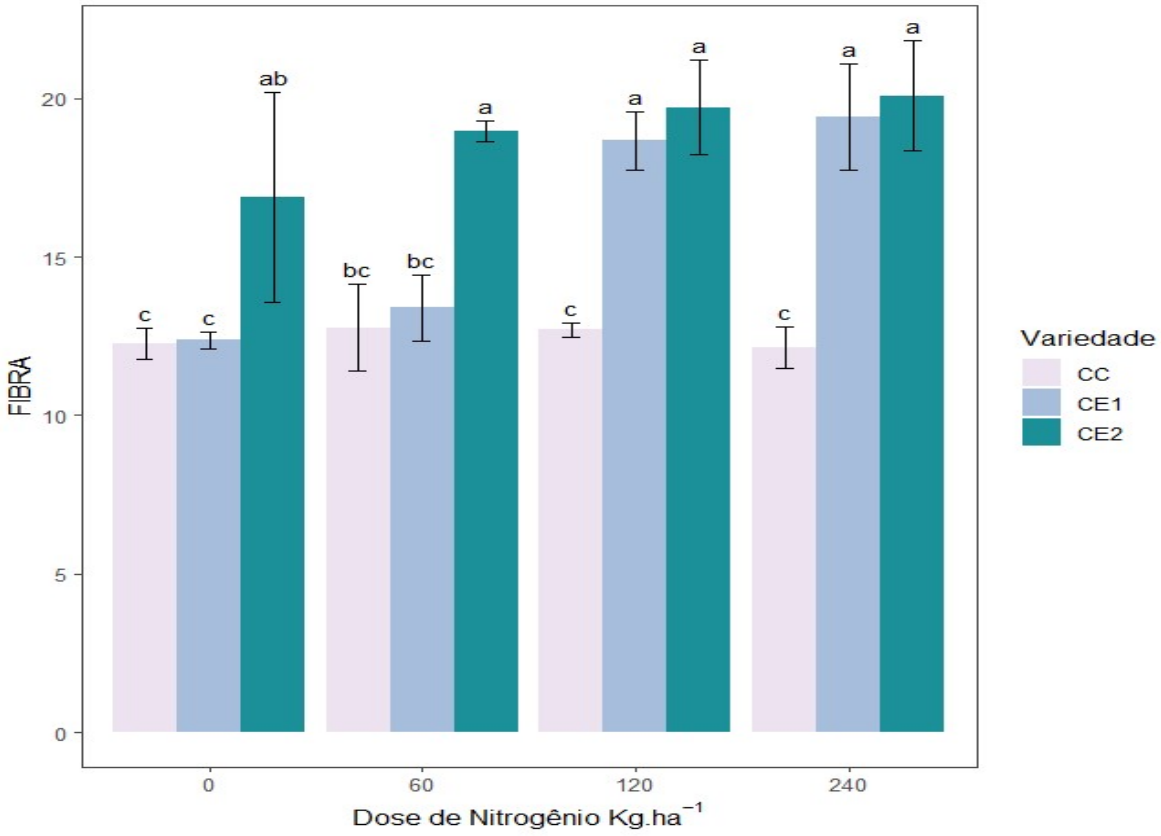
A variedade de cana CE2 foi significativamente superior às demais com valor de $p<0.001$, menor que 1% do intervalo de confiança (Figura 5).

Tabela 8 – Resumo do teste de Tukey analisando a dosagem de N kg.ha^{-1}. Cana Soca

			95% IC para diferença média				
		Diferença média	**Inferior**	**Superior**	**EP**	**t**	**p_{tukey}**
0	60	-1.207	-3.041	0.626	0.665	-1.817	0.290
	120	-3.195	-5.028	-1.361	0.665	-4.806	< .001 ***
	240	-3.391	-5.225	-1.557	0.665	-5.101	< .001 ***
60	120	-1.987	-3.821	-0.153	0.665	-2.990	0.030 *
	240	-2.184	-4.017	-0.350	0.665	-3.285	0.015 *
120	240	-0.196	-2.030	1.637	0.665	-0.295	0.991

* p < .05, *** p < .001

Figura 6 – Gráfico de velas mostrando o efeito de doses de N (kg.ha^{-1}) sobre o teor de FIBRA, nas variedades de cana CC, CE1 e CE2 - Cana Soca, onde se verifica que as doses 120 e 240 kg de N.ha^{-1} apresentaram valores de FIBRA estatisticamente semelhantes e superiores às doses 0 e 60 kg de N.ha^{-1} que foram semelhantes entre si, a 1% do intervalo de confiança

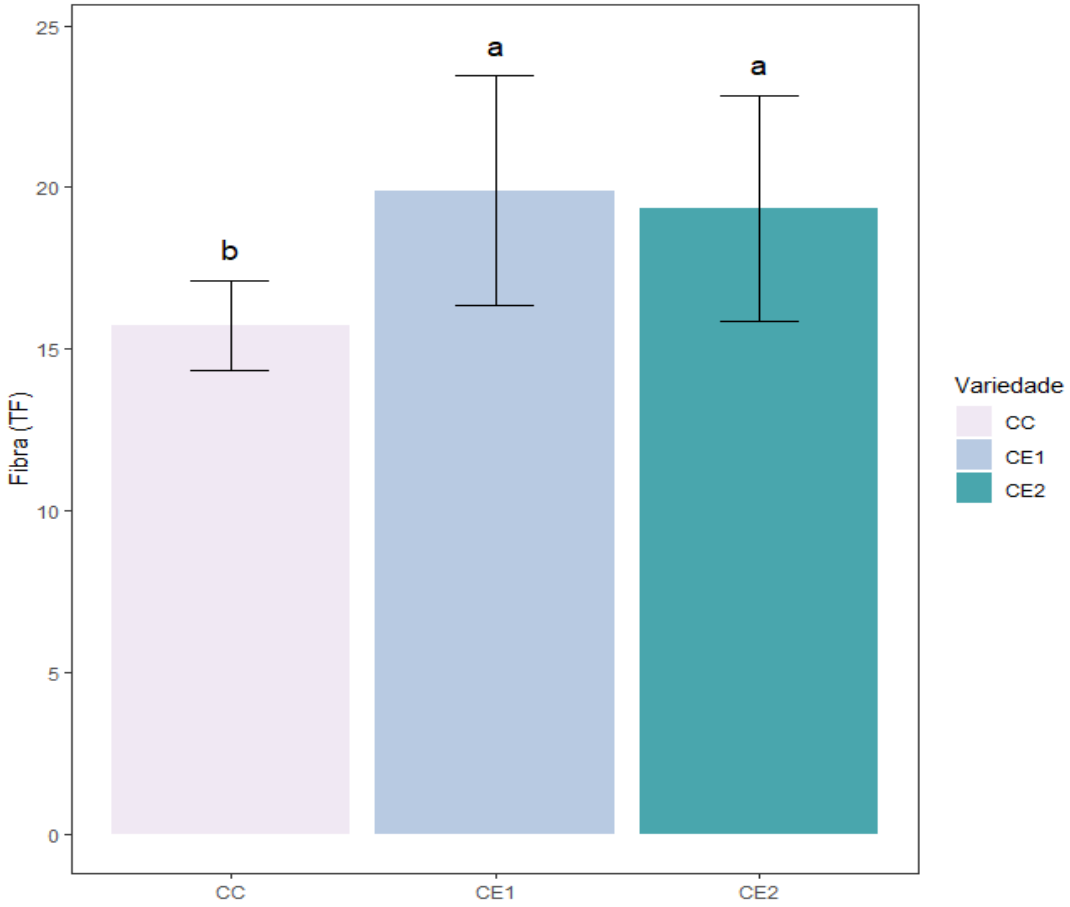


.

Tabela 9 – Resumo dos valores médios e somatória do Fibra de cada variedade sobre as dosagens de N Kg.ha^{-1} – Cana Soca

Dose de N Kg ha^{-1}	Variedade de Cana	Média	Soma	Tukey
0	CC	12.3	36.8	c
	CE1	13.4	37.1	c
	CE2	16.9	50.6	ab
60	CC	12.8	38.3	bc
	CE1	14.4	40.2	bc
	CE2	19.0	56.9	a
120	CC	12.7	38.1	c
	CE1	18.7	56.0	a
	CE2	19.7	59.2	a
240	CC	12.2	36.5	c
	CE1	19.4	58.3	a
	CE2	20.1	60.2	a

Figura 7 – Resumo dos valores médios de FIBRA de cada variedade sobre as dosagem de N Kg.ha^{-1} – Cana Soca



Em resposta a dosagem de Nitrogênio na Fibra, pode-se afirmar que a variedade CE2 nas dosagens 60,120, 240 kg.ha^{-1} e a CE1 nas dosagens de N 120, 240 kg.ha^{-1} obtiveram maior valor de fibra em relação a CC (Figura 7).

A tabela 10, mostra o resumo da análise de variância, do POL em resposta a dosagem de nitrogênio e variedade de cana (Cana Soca), e pode-se afirmar que houve uma diferença significativa na variedade de cana com intervalo de confiança a 1% e na dose de Nitrogênio no intervalo de confiança a 5%.

Tabela 10 – Resumo da análise de variância para variável produtividade por hectare (TCH), nas variedades de cana, submetida a diferentes doses de nitrogênio - Cana Soca

FV	GL	Média Quadrática
Variedade de Cana	2	20.798**
Dose de N Kg.ha^{-1}	3	9.371*
Variedade de Cana ✻ Dose de N Kg.ha^{-1}	6	4.630$_{ns}$
Resíduos	24	2.521

ns – não significativo. ** e * - significativo a 1% e 5% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

Fonte: Autores.

Figura 8 – Gráficos de vela e de linhas mostrando os resultados para variável POL em resposta a dosagem de nitrogênio e variedade de cana (Cana Soca), e pode-se afirmar que houve uma diferença significativa na variedade de cana com intervalo de confiança a 1% e na dose de Nitrogênio no intervalo de confiança a 5%

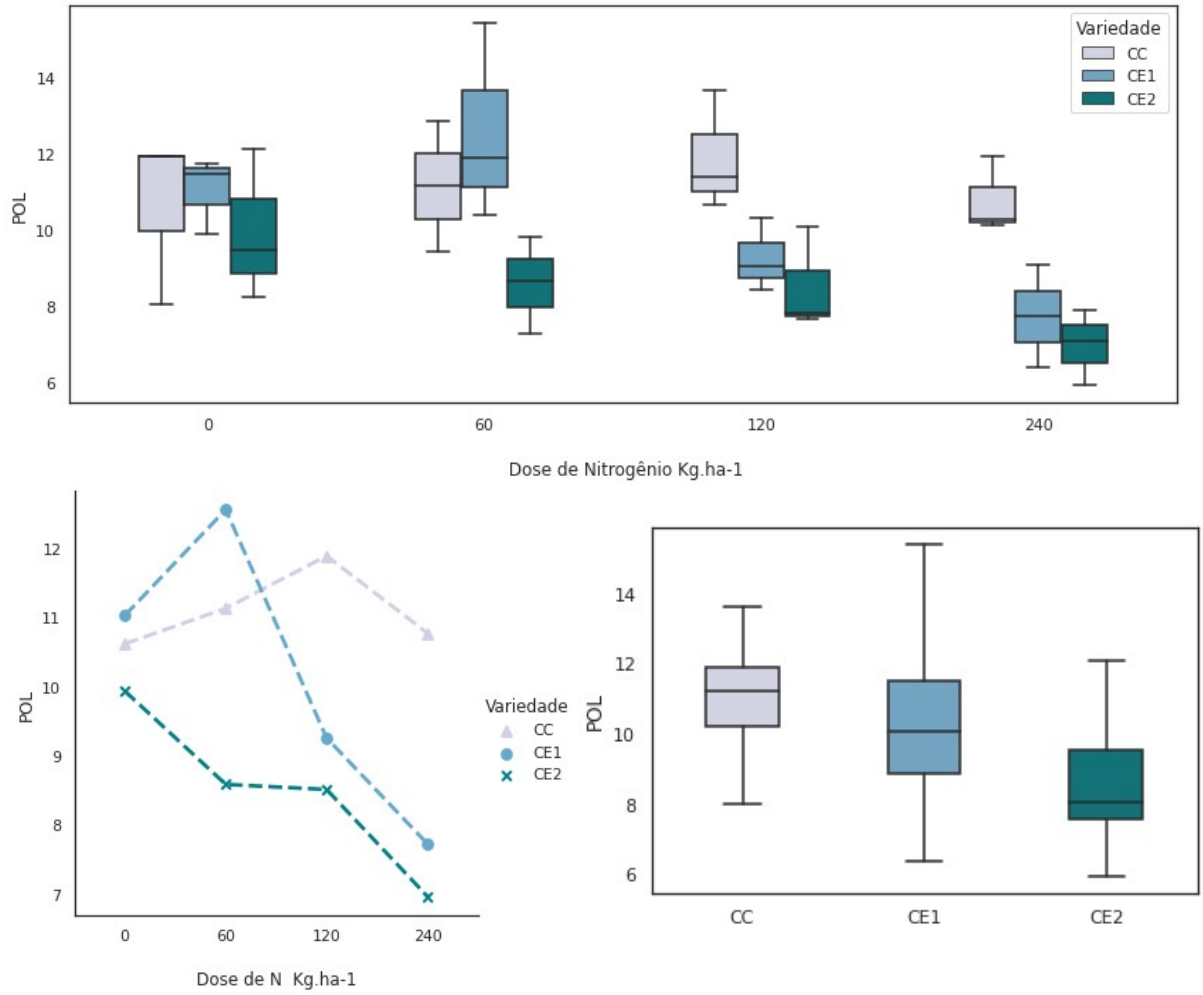


Tabela 11 – Resumo do teste de Tukey analisando a variável variedade de cana – Cana Soca

		95% IC para diferença média		
	Diferença média	**Inferior**	**Superior**	**p_{tukey}**
CC CE1	0.961	-0.658	2.579	0.317
CE2	2.603	0.985	4.222	0.001***
CE1 CE2	1.643	0.024	3.262	0.046**

		95% IC para diferença média		
	Diferença média	**Inferior**	**Superior**	**p_{tukey}**

**p < 0.1, **p < .05, ***p < .01*
Fonte: Autores.

Os valores de POL da variedade de cana CC foi significativamente superior a CE2 com valor de p <0.001, menor que 1% do intervalo de confiança e o POL de CE1 foi significativamente superior a CE2 com 5% no intervalo de confiança.

Tabela 12 - Valores médios e totais do POL de cada variedade de cana – Soca

	POL		
	CC	**CE1**	**CE2**
Média	11.107[a]	10.146[a]	8.504[b]
Desvio Padrão	1.527	2.348	1.654
Coeficiente de variação	0.138	0.231	0.194
Total	133.285	121.757	102.044

[a] *Significativo e* [b] *Não significativo*

Figura 9 – Gráfico de velas mostrando os valores de POL nas variedades de cana CC, CE1 e CE2 - Cana Soca, onde se verifica que a variedade de cana CC foi significativamente superior a CE2 com valor de p <0.001, menor que 1% do intervalo de confiança e o POL de CE1 foi significativamente superior a CE2 com 5% no intervalo de confiança

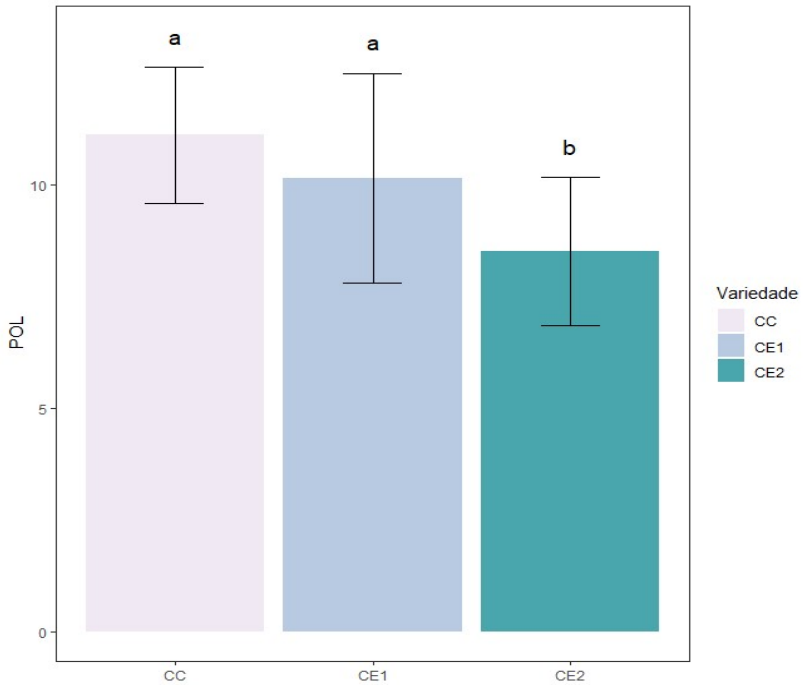


Tabela 13 - Resumo do teste Tukey para diferença das médias na dosagem de N. Cana Soca

			95% IC para diferença média		
		Diferença média	**Inferior**	**Superior**	
					p_{tukey}
0	60	-0.231	-2.296	1.834	0.990
	120	0.642	-1.423	2.706	0.826
			95% IC para diferença média		
		Diferença média	**Inferior**	**Superior**	
					p_{tukey}
	240	2.039	-0.025	4.104	0.054
60	120	0.873	-1.192	2.938	0.653
	240	2.270	0.206	4.335	0.027 *
120	240	1.398	-0.667	3.462	0.268

* p < .05

Pelo teste de Tukey, a dosagem de 60 kg de N.ha^{-1} apresentou valor de Pol significativamente superior às demais doses com valor de significância menor que 5%.

Figura 10 – Gráfico de velas mostrando os valores de POL em função de doses de N (kg.ha^{-1}) das variedades de cana CC, CE1 e CE2 - Cana Soca, onde se verifica que a dose de 60 kg de N.ha^{-1} foi significativamente superior às demais doses com valor de significância menor que 5%

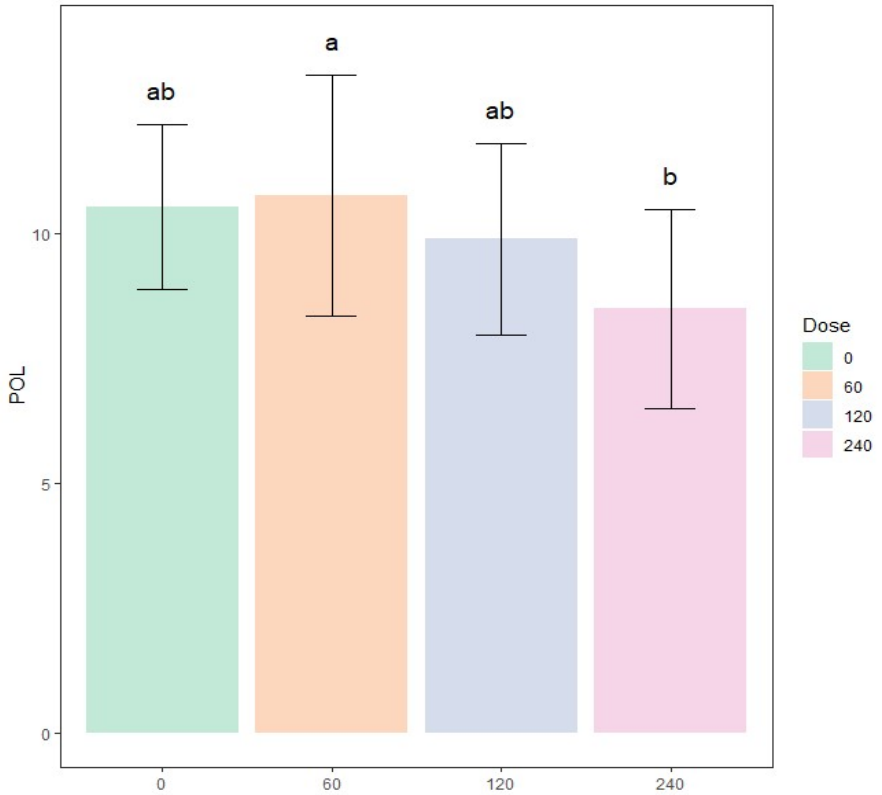


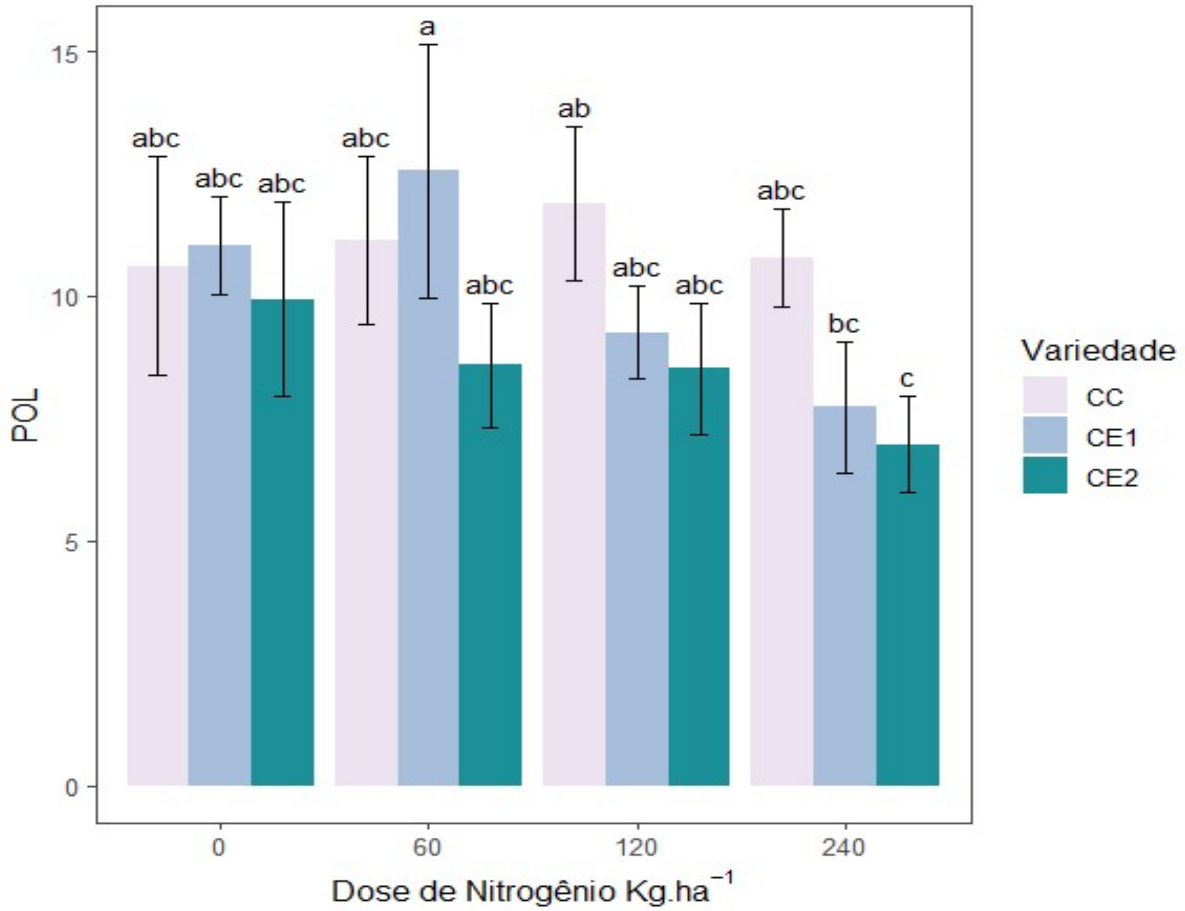
Tabela 14 – Resumo do teste de Tukey analisando a variável variedade de cana em relação e dosagem de N Kg ha^{-1} significativa, valores médios e total de POL de cada variedade sobre as dosagem de N Kg.ha^{-1} – Cana Soca

Dose de N Kg ha-1	Variedade de Cana	Média	Soma	Tukey
0	CC	10.62	31.9	abc
	CE1	11.03	33.1	abc
	CE2	9.94	29.8	abc
60	CC	11.14	33.4	abc
	CE1	12.56	37.7	a
	CE2	8.59	25.8	abc
120	CC	11.89	35.7	ab
	CE1	9.26	27.8	abc
	CE2	8.52	25.5	abc
240	CC	10.78	32.3	abc
	CE1	7.73	23.2	bc
	CE2	6.97	20.9	c

[a] *Significativo* [ab] *e* [abc] *Não significativo*

Em resposta a dosagem de Nitrogênio no POL, pode afirmar que a variedade CE1 na dosagem de N 60 kg.ha^{-1} (média de 12,56 %ª) obteve maior valor (Tabela 14 e Figura 11).

Figura 11 – Resumo dos valores médios de FIBRA de cada variedade sobre as dosagem de N Kg.ha^{-1} – Cana Soca



Conclusões

A produtividade por hectare (TCH) em resposta a dosagem de nitrogênio apresentou diferença significativa entre as variedades de cana com intervalo de confiança de 5%. As variedades de cana CC e CE1 apresentaram TCH significativamente superior a variedade CE2 com valor menor que 1% do intervalo de confiança. Em resposta a dosagem de Nitrogênio na produtividade por hectare (TCH), as variedades CC e CE1 sem adição de N kg.ha^{-1} obtiveram maior produtividade, nas demais doses, não houve diferença estatisticamente significativa, nem a 1%, nem a 5%. A variável Fibra em resposta a dosagem de nitrogênio e variedade de cana (Cana Soca), apresentou diferença significativa nos resultados para variedade de cana e para dose de Nitrogênio, como também para a interação variedade x dosagem kg.ha^{-1}, com intervalo de confiança a 1%. A

variedade de cana CE2 foi significativamente superior às demais a 1% do intervalo de confiança. Em resposta a dosagem de Nitrogênio na Fibra, pode-se afirmar que a variedade CE2 nas dosagens 60,120, 240 kg.ha^{-1} e a CE1 nas dosagens de N 120, 240 kg.ha^{-1} obtiveram maior valor de fibra.

Para a Pol houve resposta a dosagem de nitrogênio e variedade de cana (Cana Soca), houve diferença significativa na variedade de cana com intervalo de confiança a 1% e na dose de Nitrogênio no intervalo de confiança a 5%. A variedade de cana CC foi significativamente superior a CE2 a 1% do intervalo de confiança e o POL de CE1 foi significativamente superior a CE2 com 5% no intervalo de confiança. Pelo teste de Tukey, a dosagem de 60 kg de N.ha^{-1} apresentou valor de POL significativamente superior às demais doses com significância menor que 5%. Em resposta a dosagem de Nitrogênio no POL, pode afirmar que a variedade CE1, dose de N 60 kg.ha^{-1} obteve maior valor.

Agradecimentos

A Usina Granelli na pessoa, Sr. José Granelli, e no acordo de cooperação técnica entre a Embrapa Agricultura Digital e a Cooperativa de Plantadores de Cana (Coplacana), no âmbito da parceria no Projeto " Desenvolvimento de soluções tecnológicas com escopo na recuperação da produtividade da cana-de-açúcar".

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Caio Soares de. *Silício na mitigação dos danos causados pela deficiência moderada de ferro em cana-energia*. 2021. 40 p. Dissertação – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Jaboticabal, 2021.

BRAOS, Bruno Boscov. *Extratores para nitrogênio disponível do solo***.** 2012. 40 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Jaboticabal, 2012.

CARVALHO NETTO, Osmar *et al.* The potential of the energy cane as the main biomass crop for the cellulosic industry. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture,* v. 1, n. 20, 2014.

COELHO, Mateus Costa. *Efeitos da remoção do palhiço residual na ciclagem de nutrientes e no desempenho agronômico da cana de açúcar*. 2015. 53 p. Dissertação (mestrado) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2015.

COPEL. Biomassa. *Copel Pura energia*, Curitiba. 18 jan. 2016. Disponível em:

https://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2F24349F1A246428E1032574240049F201. Acesso em: 21 set. 2022.

EMBRAPA. *Cana*. Disponível em: https://www.embrapa.br/agencia-de-informacaotecnologica/cultivos/cana. Acesso em: 24 set. 2022.

EPE. *Anuário estatístico de energia elétrica.* Empresa de pesquisa energética. Disponível em: http://shinyepe.brazilsouth.cloudapp.azure.com:3838/anuariolivro/#Cap%C3%ADtulo_1:_Panorama_Mundial. Acesso em: 29 out. 2022.

EVOLUÇÃO das vendas de combustíveis líquidos. Instituto brasileiro de petróleo e gás natural, 2023. Disponível em: https://www.ibp.org.br/observatorio-dosetor/snapshots/evolucao-das-vendas-de-combustiveisliquidos/#:~:text=O%20consumo%20de%20gasolina%20fechou,de%20diesel%20se%20mant eve%20est%C3%A1vel. Acesso em 28 fev. 2023.

FERNANDES, Rafael Pires. *Fluxos hidrológicos e transporte de nitrogênio em plantios de cana-de-açúcar.* 2014. 111 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

GALLOWAY, James N; ABER, John D; ERISMAN, Jan Willem; SEITZINGER, Sybil P; HOWARTH, Robert W; COWLING, Ellis B; COSBY, Jack. The nitrogen cascade. *BioScience,* Washington, DC, v. 53, p. 341-356, 2003.

GASQUI, Luís Fernando Xavier. *Estabelecimento de padrões nutricionais para o ATR da cana-de-açúcar.* 2018. 51 p. Tese (Mestrado em Agronomia) – Universidade do Oeste Paulista, Presidente Prudente, 2018.

LEITE, José Marcos. *Acúmulo de fitomassa e de macronutrientes da cana-de-açúcar relacionadas ao uso de fintes de nitrogênio.* 2011. 91 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

MARIANO, Jorge. Cana-energia, a revolução sucroenergética está começando. *NovaCana.* Disponível em: Cana-energia, a revolução sucroenergética está começando (novacana.com). Acesso em: 11 abr. 2023.

MARIN, Fábio Ricardo. *Eficiência de produção da cana-de-açúcar brasileira*: estado atual e cenários futuros baseados em simulações multimodelos. 2014. 262. Livre Docência - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

MATSUOKA, Sizuo; KENNEDY, Anthony J; SANTOS, Eder Gustavo dos; TOMAZELA, André L; RUBIO, Luis Claudio S. Energy Cane: Its Concept, Development, Characteristics, and Prospects. *Hindawi Publishing Corporation.* 13 p. Set, 2014.

MEYER, Maurício Conrado; BUENO, Adeney de Freitas; MAZARO, Sérgio Miguel; SILVA, Juliano Cesar da. *Bioinsumos na cultura da soja.* Ed 1. Brasília: Embrapa, 2022.

MORENO, Giovane. *Eficiência da adubação nitrogenada na cultura da soja.* 2015. 31 p. Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Palotina, 2015.

OKUNO, Fábio Makoto. *Desempenho econômico de um sistema de produção de biomassa da cana energia.* 2016. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11152/tde-07062016183901/. Acesso em: 11 abr. 2023.

OLIVEIRA, Kamilla Silva. *Respostas de cana-de-açúcar e de cana-energia à aplicação de manganês com silício via radicular e foliar.* 2022. 142 p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2022.

OLIVEIRA, Mauro Wagner de; MACÊDO, Geraldo Antônio Resende; MARTINS; Jolberto Alves; SILVA, Vinicius Santos Gomes da; OLIVEIRA, Alexandre Bosco de. *Sugarcane - Technology and Research*: Mineral Nutrition and Fertilization of Sugarcane. Flórida, IntechOpen, 16. mai. 2018.

PILLON, Clenio Nailto; MIELNICZUK, João; NETO, Ladislau Martin. *Dinâmica da matéria orgânica*. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 105. Pelotas, 2002.

RAMOS, Rachel Soares. *Seleção de cana energia*. 2015. 78 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

RAVELI, Marcelo Boamorte. *Controle de qualidade no plantio de cana-de-açúcar*. 2013. 66 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, 2013.

ROSSETTO, Raffaella. Cana. *Avanço Tecnológico*. Embrapa. Disponível em: https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/producao/avancotecnologico. Acesso em: 24 set. 2022.

SILVA, Fábio Cesar. *Fenologia.* Empresa brasileira de pesquisa agropecuária. Disponível em: https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/preproducao/caracteristicas/fenologia. Acesso em: 11. dez. 2024.

SILVA, Robson Willians da Costa. *Processos hidrológicos e transporte de nitrogênio e carbono em bacias hidrográficas com cobertura de cana-de-açúcar.* 2014. 145 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

SILVA, Jovanderson Jackson Batista da. *Análise da variação diurna de carboidratos e metabólitos de cana-energia e cana-de-açúcar*. 2021. 118 p. Dissertação (mestrado) - Instituto de Biologia da Universidade Estadual de Campinas, 2021.

SILVA, Fabio Cesar da. *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes*. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627p.

UNIÃO DOS PRODUTORES DE BIOENERGIA – UDOP. Disponível em: UDOP - União Nacional da Bioenergia. Acesso em 14 abr. 2023.

UNICA. *Bioeletricidade conjuntura atual e perspectivas futuras*. Disponível em: https://unica.com.br/noticias/bioeletricidade-conjuntura-atual-e-perspectivas-futuras/. Acesso em: 08 de mai. 2023.

ÚNICA. *Setor sucroenergético gerou 79% da bioeletricidade ofertada a rede*. Disponível em: https://unica.com.br/noticias/setor-sucroenergetico-gerou-79-da-bioeletricidade-ofertadaa-rede/. Acesso em 25 mar. 2023.

VALADÃO, Isabella Barros. *Caracterização morfofisiológica de genótipos de cana-de-açúcar e cana-energia.* 2020. 69 p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2020.

1 SILVA, Fabio Cesar da. Possui graduação em Engenharia Agronomica pela Universidade de São Paulo (1987), graduação em Engenharia Florestal pela Universidade de São Paulo (1987), mestrado em Solos e Nutricäo de Plantas pela Universidade de São Paulo (1991) e doutorado em Solos e Nutricäo de Plantas pela Universidade de São Paulo (1995). Atualmente é professor pleno 1 (equivalente: adjunto) da FACULDADE DE TECNOLOGIA DO ESTADO DE SÃO PAULO e pesquisador doutor da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Tem experiência na área de Agronomia, com ênfase em Nutrição Mineral na Agricultura, atuando principalmente nos seguintes temas: cana-de-acucar, metais pesados, cana-de-açúcar, agroindustria sucroalcooleira e modelagem matemática.

2 SANTOS, Jennifer Thamara Conceição. Possui graduação em Tecnologia em Biocombustíveis pela FATEC Piracicaba Dep. "Roque Trevisan" – Centro Estadual de Educação Tecnológica "Paula Souza" – CEETEPS.

3 CARVALHO, Sânida Santos de. Possui graduação em Tecnologia em Biocombustíveis pela FATEC Piracicaba Dep. "Roque Trevisan" – Centro Estadual de Educação Tecnológica "Paula Souza" – CEETEPS.

4 MARCHIORI, Luis Fernando Sanglade. Possui graduação em Engenharia Agronômica pela Faculdade de Agronomia e Zootecnia Manoel Carlos Gonçalves (1986), Mestrado em Agronomia, área de concentração Fitotecnia pela Universidade de São Paulo (1998) e Doutorado em Agronomia, área de concentração Fitotecnia pela Universidade de São Paulo (2004). Atualmente é Professor na Faculdade de Tecnologia de Piracicaba e Diretor Técnico da Estação Experimental Luiz de Queiroz da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo. Tem experiência nas áreas de Engenharia com ênfase em projetos e estudos hidrológicos e uso racional da água e Agronomia, com ênfase em Manejo e Tratos Culturais, atuando principalmente nos seguintes temas: Cana-de-açúcar; Desempenho em épocas de plantio e colheita; Sistemas de plantio cana inteira ou picada; Soja; Desempenho em épocas de semeadura Normal e Safrinha, populações e cultivares; Análise de crescimento da soja em diversas épocas de semeadura, cultivares e populações. Sistemas Agroflorestais com ênfase na produção de cacau semi sombreado.

5 LIENDO SILVA, Gael Silvia Penaranda. Possui graduação em Engenharia Química. Pós-graduação em PROTEÇÃO RADIOLÓGICA. Universidad de Buenos Aires, UBA, Argentina. Mestre em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas.

6 ABREU JUNIOR, Cassio Hamilton. Graduação em Engenharia Agronômica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (1989). Mestrado em Ciências (Energia Nuclear na Agricultura) pela Universidade de São Paulo (1993) e doutorado em Agronomia (Solos e Nutrição de Plantas) pela Universidade de São Paulo (1999) e livre-docência pela Universidade de São Paulo (2011). Atualmente é Professor Associado da Universidade de São Paulo - CENA. Tem experiência na área de Agronomia, com ênfase em Fertilidade do Solo e Adubação, atuando principalmente nos seguintes temas: lodo de esgoto, composto orgânico, composto de lixo, metais pesados, nitrogênio, fósforo e composto de lixo.

Cultivo e multiplicação *in vitro* de sorgo

NOGUEIRA, Tainá Caroline
NASCIMENTO, Daniela Defavari do

Resumo

O sorgo (*Sorghum bicolor*) é uma das culturas mais produzidas globalmente, tem ciclo de vida curto e baixa exigência nutricional, o que o torna uma opção viável para a alimentação humana e animal. A cultura de tecidos vegetais consiste em ferramenta importante na agricultura devido às diversas aplicações que oferece para programas de melhoramento vegetal, incluindo clonagem de plantas, melhoramento genético e produção de mudas saudáveis. Um dos desafios enfrentados é a produção e obtenção de mudas selecionadas a partir de matrizes superiores, para o qual a micropropagação é uma alternativa promissora. Neste estudo, a multiplicação *in vitro* de explantes de sorgo foi avaliada em meio de cultura MS, com diferentes proporções de reguladores vegetais, para obter mudas saudáveis e selecionadas. As concentrações testadas foram: T1 - 50% dos sais do meio MS; T2 - 50% dos sais do meio MS + 1,5 mg.L^{-1} de 2,4-D; T3 - 50% dos sais do meio MS + 2 mg.L^{-1} de 2,4-D; T4 - 50% dos sais do meio MS + 2,5 mg.L^{-1} de 2,4-D. Todos os tratamentos foram suplementados com sacarose (30 g.L^{-1}) e agente solidificante phytagel (2,4 g.L^{-1}). Os resultados do estudo indicam que o tratamento T1, com 50% dos sais do meio MS, foi o mais eficaz na emergência de brotos quando os explantes foram retirados do caule. Por outro lado, o tratamento T4, com 50% dos sais do meio MS e 2,5 mg.L^{-1} de 2,4-D, resultou na formação de calos nos explantes do caule. Os resultados obtidos demonstram a importância do ajuste adequado dos reguladores vegetais para obteção do produto de interesse sejam mudas saudáveis e selecionadas, ou a proliferação celular no cultivo *in vitro* de sorgo.

Palavras-chaves: Sorgo, micropropagação, biotecnologia.

Abstract

Sorghum (*Sorghum bicolor*) is one of the most widely produced crops worldwide. It has a short life cycle and low nutritional requirements, making it a viable option for human and animal nutrition. Plant tissue culture is an important tool in agriculture due to the many applications it offers for plant breeding programs, including plant cloning, genetic improvement, and production of healthy seedlings. One of the challenges faced is the production and obtaining of selected seedlings from superior matrices, for which micropropagation is a promising alternative. In this study, the in vitro multiplication of sorghum explants was evaluated in MS culture medium with different proportions of plant growth regulators to obtain healthy and selected seedlings. The concentrations tested were: T1 - 50% of MS medium salts; T2 - 50% of MS medium salts + 1.5 mg.L^{-1} of 2,4-D; T3 - 50% of MS medium salts + 2 mg.L^{-1} of 2,4-D; T4 - 50% of MS medium salts + 2.5 mg.L^{-1} of 2,4-D. All treatments were supplemented with sucrose (30 g.L-1) and phytagel solidifying agent (2.4 g.L^{-1}). The results of the study indicate that treatment T1, with 50% of MS medium salts, was the most effective in the emergence of shoots when the explants were removed from the stem. On the other hand, treatment T4, with 50% of MS medium salts and 2.5 mg.L^{-1} of 2,4-D, resulted in the formation of callus in stem explants. Results obtained demonstrate the importance of adequate adjustment of plant growth regulators to obtain the product of interest, whether healthy and selected seedlings, or cell proliferation in *in vitro* culture of sorghum.

Keywords: Sorghum, micropropagation, biotechnology.

Resumen

El sorgo (*Sorghum bicolor*) es uno de los cultivos más producidos a nivel mundial, tiene un ciclo de vida corto y bajos requerimientos nutricionales, lo que lo convierte en una opción viable para la nutrición humana y animal. El cultivo de tejidos vegetales es una herramienta importante en la agricultura debido a las diversas aplicaciones que ofrece para los programas de mejoramiento vegetal, incluyendo la clonación de plantas, el mejoramiento genético y la producción de plántulas sanas. Uno de los desafíos que se enfrentan es la producción y obtención de plántulas seleccionadas a partir de matrices superiores, para lo cual la micropropagación es una alternativa promisoria. En este estudio se evaluó la multiplicación in vitro de explantos de sorgo en medio de cultivo MS, con diferentes proporciones de fitoreguladores, para obtener plántulas sanas y seleccionadas. Las concentraciones probadas fueron: T1 - 50% de las sales del medio MS; T2 - 50% de sales del medio MS + 1,5 $mg.L^{-1}$ de 2,4-D; T3 - 50% de sales del medio MS + 2 $mg.L^{-1}$ de 2,4-D; T4 - 50% de sales del medio MS + 2,5 $mg.L^{-1}$ de 2,4-D. Todos los tratamientos fueron suplementados con sacarosa (30 $g.L^{-1}$) y agente solidificante phytagel (2,4 $g.L^{-1}$). Los resultados del estudio indican que el tratamiento T1, con 50% de las sales en el medio MS, fue el más efectivo en la emergencia de brotes cuando los explantos fueron retirados del tallo. Por otra parte, el tratamiento T4, con 50% de las sales del medio MS y 2,5 $mg.L^{-1}$ de 2,4-D, produjo la formación de callos en los explantos del tallo. Los resultados obtenidos demuestran la importancia del adecuado ajuste de los reguladores vegetales para obtener el producto de interés, ya sean plántulas sanas y seleccionadas, o proliferación celular en el cultivo in vitro de sorgo.

Palabras Clave: Sorgo, micropropagación, biotecnología.

INTRODUÇÃO

O sorgo (*Sorghum bicolor*) é uma monocotiledônea, designado com metabolismo C4, ciclo de vida de curta duração (Doggett, 1988) com pouca exigência nutricional. É um dos principais cereais produzidos em todo o mundo, sendo utilizado tanto para a alimentação humana quanto de animais.

Existem quatro tipos de sorgo, entre eles estão o sorgo granífero, o sorgo sacarino,o sorgo forrageiro e o vassoura. O sorgo granífero é utilizado tanto para a alimentaçãode animais quanto de humanos. O sorgo sacarino é um forte candidato para a produção de biocombustíveis, devido ao acúmulo natural de açúcar em seus colmos. O sorgo forrageiro é amplamente utilizado no Brasil, por causa de sua alta produtividade e boa adequação à mecanização, servindo como alimento para animais. O sorgo vassoura é empregado como matéria prima para a produção de vassouras (Schimidt, 1987).

A cultura de tecidos vegetais se apresenta como relevante ferramenta da agricultura pelas várias aplicações que possui em programas de melhoramento vegetal, como a clonagem de vegetais, o melhoramento genético e a produção de mudas sadias. Porém, o gênero *Sorghum* é considerado recalcitrante para a regeneração de plantas e transformação genética (Raghuwanshi; Birch, 2010). Um dos fatores que influencia diretamente é a produção excessiva de compostos fenólicos, que causam a oxidação e consequentemente a possível perda do material vegetal (Nguyen *et al.,* 2007). A fim de reduzir a produção dos compostos fenólicos são utilizados agentes antioxidantes (Nguyen *et al*., 2007). Muitos fatores influenciam na cultura de tecidos do sorgo, entre eles estão: o genótipo, a idade do explante e a composição do meio de cultura (Indra; Krishnaveni, 2009).

Um dos desafios a ser vencido em qualquer cultura é a produção e obtenção de mudas selecionadas a partir de plantas matrizes superiores potenciais, e adaptadas a outras regiões do país, como a região sudeste. Com isso, a micropropagação aparece como alternativa viável para obtenção de plantas livres de patógenos e para a propagação de elevada quantidade de plantas, em curto período de tempo. Ao final do projeto, espera-se obter protocolo otimizado para micropropagação de sorgo.

O objetivo deste trabalho foi o cultivo de células e tecidos *in vitro*, bem como desenvolver protocolo para a multiplicação de sorgo *in vitro* possibilitando a futura utilização em programas de manipulação genética da espécie. Especificamente, coletou-se explantes de sorgo, procedeu-se a devida assepsia para estabelecimento de cultura de tecidos *in vitro*, testando e ajustando protocolos

para obtenção de mudas clones.

1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Há indícios que o homem entrou em contato o sorgo antes de 8000 antes de Cristo (a.C.) (Smith; Frederiksen, 2000), mas sua domesticação somente ocorreu na Etiópia e em países vizinhos por volta de 4000-3000 a.C.. Ao longo dos anos muitas variedades foram melhoradas dependendo do interesse do agricultor, sendo gerados vários genótipos de sorgos. Em 1500-1000 a.C., esses genótipos foram transportados para outros países com a utilização de rotas comercias, sendo introduzidos em outras regiões da África e da Ásia (Doggett, 1970).

Nos Estados Unidos, o cultivo de sorgo teve início em 1900, sendo desenvolvido diversos tipos, variedades e raças, criadas a partir de melhoramentos genéticos, barreiras geográficas e recombinações entre os diversos genótipos existentes (Dillon *et al*, 2007).

No Brasil, acredita-se quea cultura do sorgo foi introduzida por escravos africanos na região Nordeste no sec. XIX, mas como o milho já estava estabelecido no mercado interno e era considerado umgrão nobre, sua expansão comercial não teve tanto sucesso (Morgado, 2005).

A partir da década de 1970 foi alcançada a área de plantio de 80 mil hectares, concentrada principalmente no Rio Grande do Sul e São Paulo (Tabosa *et al*, 1999), mas seu cultivo ainda mantem-se limitado.

Existem basicamente quatro tipos de sorgo, os quais são o granífero, o sacarino, o forrageiro e o vassoura. O sorgo granífero é consumido nos países asiáticos e africanos na forma de farinha para complementar a dieta da população, porém nos países desenvolvidos essa farinha de sorgo é utilizada como substituto do milho na produçãode ração de bovinos, suínos e aves. Este tipo de sorgo também pode ser utilizado na produção de álcool, amido, cêra, cerveja, óleo e entre outros. O sorgo sacarino apresentanaturalmente um acumulo de açúcar em seus colmos, podendo ser utilizado para a produção de biocombustíveis e com a utilização dos mesmos equipamentos de colheita e de fermentação da cana de açúcar. O sorgo forrageiro é o tipo de sorgo mais difundido entre os produtores brasileiros devido a sua alta produtividade, boa adequação à mecanização, qualidade para a produção de ração animal e versatilidade, podendo ser utilizado para a produção de feno, silagem e pastejo direto. O sorgo vassoura é utilizado para a fabricação de vassouras (Schimidt, 1987).

O cultivo *in vitro* é uma ferramenta da biotecnologia que é importante na obtenção de plantas livres de doenças e pragas, além de propiciar a produção de um número significativo de

novas mudas uniformes. No entanto, também é usada como meio para germinar sementes de dura propagação pelos métodos convencionais (Pasqual *et al,*1998).

O sorgo é o 5º cereal mais produzido no mundo, sua produção fica somente atrás domilho, arroz, trigo e cevada. Entre os maiores produtores de sorgo estão: o México, a Nigéria e os Estados Unidos. O Brasil encontra-se na 8ª colocação (FAO, 2022).

O sorgo é utilizado tanto para alimentação humana quanto animal (Gao et al., 2013). Quando comparado com o arroz, o sorgo possui maiores níveis de componentes nutricionais, como fibra bruta, cálcio, fósforo e proteína (Indra; Krishnaveni, 2009).

Com a cultura de meristemas apicais ou embrião somático, pode-se pensar em obterplantas isentas de vírus, e com a cultura de gemas axilares e demais explantes, propagar milhares de plantas, com genótipos superiores, por exemplo, resistentes a nematóides, *Fusarium*, etc (Barrueto Cid, 2014).

Uma planta cultivada *in vitro* tem seu metabolismo heterotrófico e por isso depende de: água, macro e micronutrientes, e carboidrato, como fonte de carbono (Pierik, 1988).

Na cultura de tecidos do sorgo, vários explantes já foram testados para obter a produção de calos embriogênicos e sua posterior regeneração, entre eles estão: asinflorescências imaturas (Gupta *et al,* 2006), os segmentos apicais (Maheswari *et al,* 2006) e os embriões imaturos (Liu; Godwin, 2012). Porém a taxa de regeneração é ineficaz, devido às dificuldades existentes em estabelecer uma cultura de tecidos e suaregeneração por longos períodos (Jogeswar et al, 2007).

A regeneração do sorgo ocorre em duas etapas, onde é realizada a indução de calose a posterior transferência para o meio de regeneração (Gupta *et al*, 2006).

A fase de indução de calos ocorre devido à adição de diferentes concentrações de 2,4-D, sendo este um dos reguladores de crescimento mais eficientes para se obter o desenvolvimentode calos, não somente para sorgo, mas para monocotiledôneas em geral (Bhaskaran; Smith, 1988).

A regeneração de plantas pode ocorrer em meio de cultura acrescido ou não de reguladores de crescimento, entre os principais utilizados estão as auxinas e as citocininas. Nesta fase, pode ocorrer um efeito residual dosreguladores que ainda se mantiveram no material vegetal proveniente da fase de induçãode calos (Gupta *et al,* 2006).

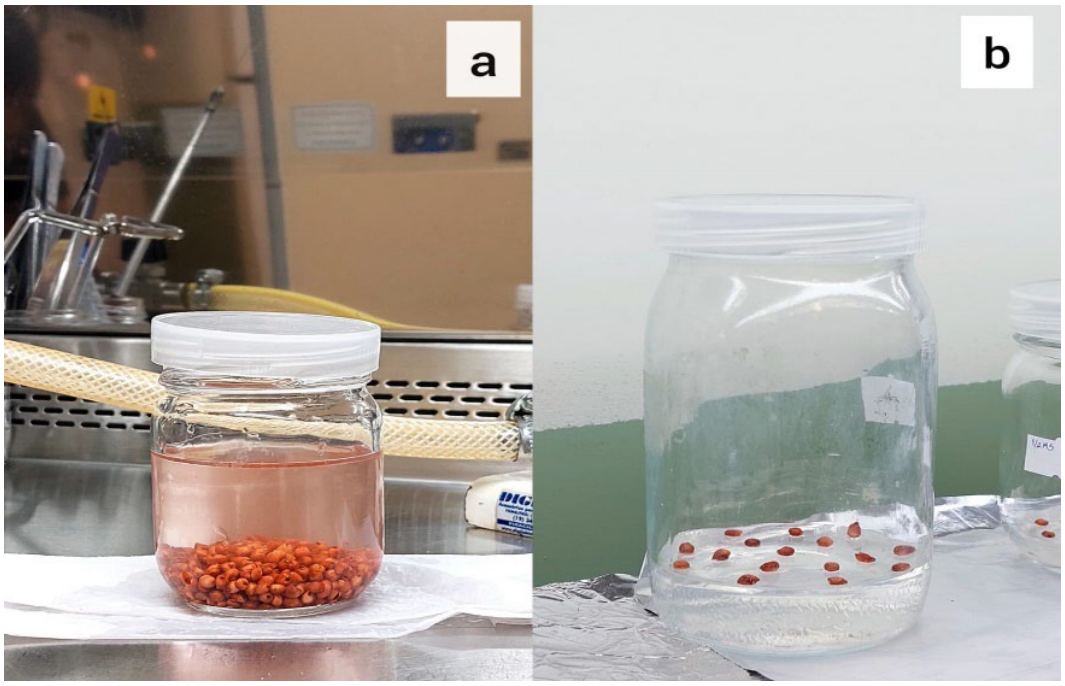
2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizadas sementes de sorgo coletadas no município de Santa Cruz das Palmeiras-SP, para germinarem *in vitro* e posteriormente fornecerem explantes para a micropropagação.

No laboratório, as sementes foram lavadas com detergente neutro durante cinco minutos

e transferidas para recipiente com água destilada autoclavada. Após a lavagem, as sementes foram colocadas em uma câmara de fluxo para realização da assepsia com a solução de hipoclorito de sódio comercial (3:1) por dez minutos, seguida de lavagem em solução de etanol 70% por cinco minutos (Figura 1a). Posteriormente, enxaguados em água autoclavada e inoculados no meio de cultura T1 (Figura 1b).

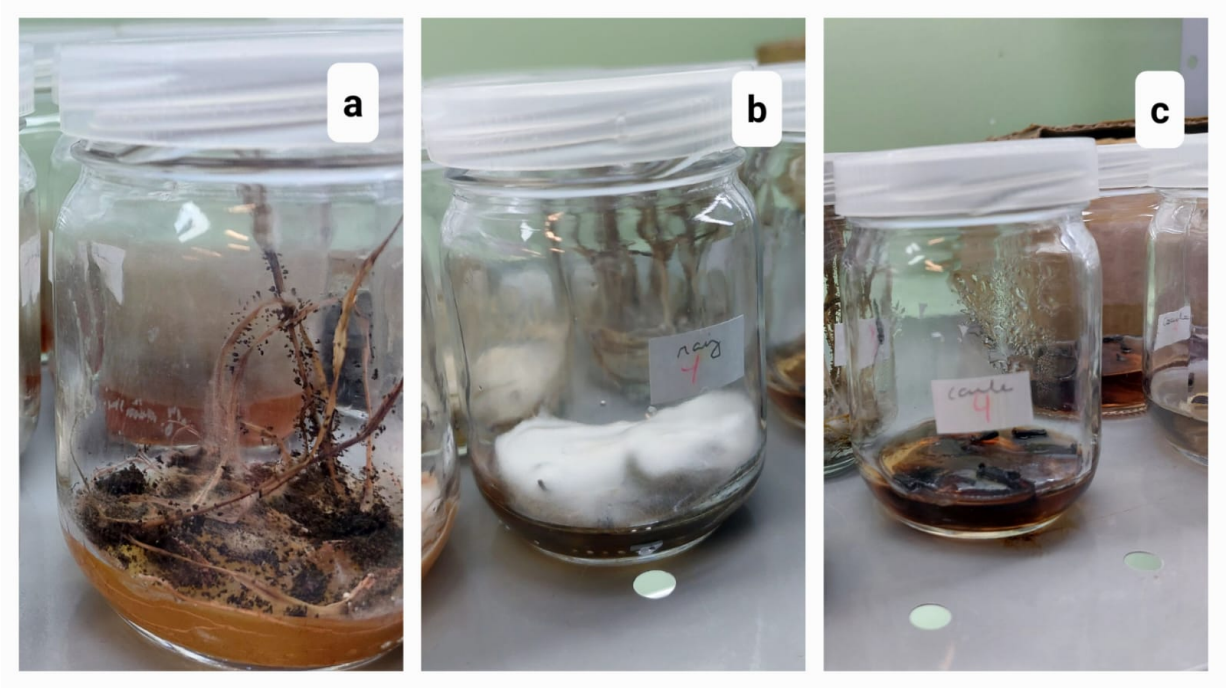
Figura 1. (a) Assepsia das sementes e; (b) Inoculação



Fonte: Autor.

A cada 15 dias, os explantes foram inspecionados para detectar eventuais contaminações (Figura 2(a) e (b)). Caso houvesse contaminação, os explantes eram descartados e os recipientes contaminados eram submetidos à autoclavagem a 120º C e 1 $Kgf.cm^{-2}$ por 15 minutos, a fim de descartar os microrganismos com segurança.

Figura 2. (a) e (b) contaminações nos vidros



Fonte: Autor.

Os tratamentos foram baseados em ensaios pilotos (Hosaka, 2014) para o cultivo *in vitro* de sorgo, e com isso foram realizados os seguintes tratamentos: T1 – 50% dos sais do meio MS (Murashige; Skoog, 1962); (Anexo 1) T2 – 50% dos sais do meio MS + 1,5 $mg.L^{-1}$ de 2,4-D; T3 – 50% dos sais do meio MS + 2$mg.L^{-1}$ de 2,4-D; T4 – 50% dos sais do meio MS + 2,5 $mg.L^{-1}$ de 2,4-D;. Todos os tratamentos são suplementados com sacarose (30 $g.L^{-1}$) agente gelificante phytagel (2,4 $g.L^{-1}$). O pH é aferido para 5,7±1 antes da autoclavagem (esterilização) a 120° C e 1 $Kgf.cm^{-1}$ por quinze minutos. A incubação foi realizada em sala climatizada de crescimento com temperatura 22 ± 3° C, sob fotoperíodo de 16 horas de luz.

Os explantes foram avaliados a cada 7 dias, contados da datade inoculação, período esse que compreende a fase de estabelecimento da cultura.

As variáveis avaliadas: porcentagem de embriões de sorgo sobreviventes e porcentagem de gemas apicais e embriões crescidos, determinado através da avaliação visual do aparecimento de folhas, gemas laterais e calos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O processo de inoculação das sementes foi realizado exclusivamente no meio de cultura T1. Após a germinação, os explantes foram distribuídos em todas as formulações dos meios de cultura, sendo separados por folhas, segmentos de caule e segmentos de raiz (obtidos a partir de plantas germinadas no meio T1) Figura 3.

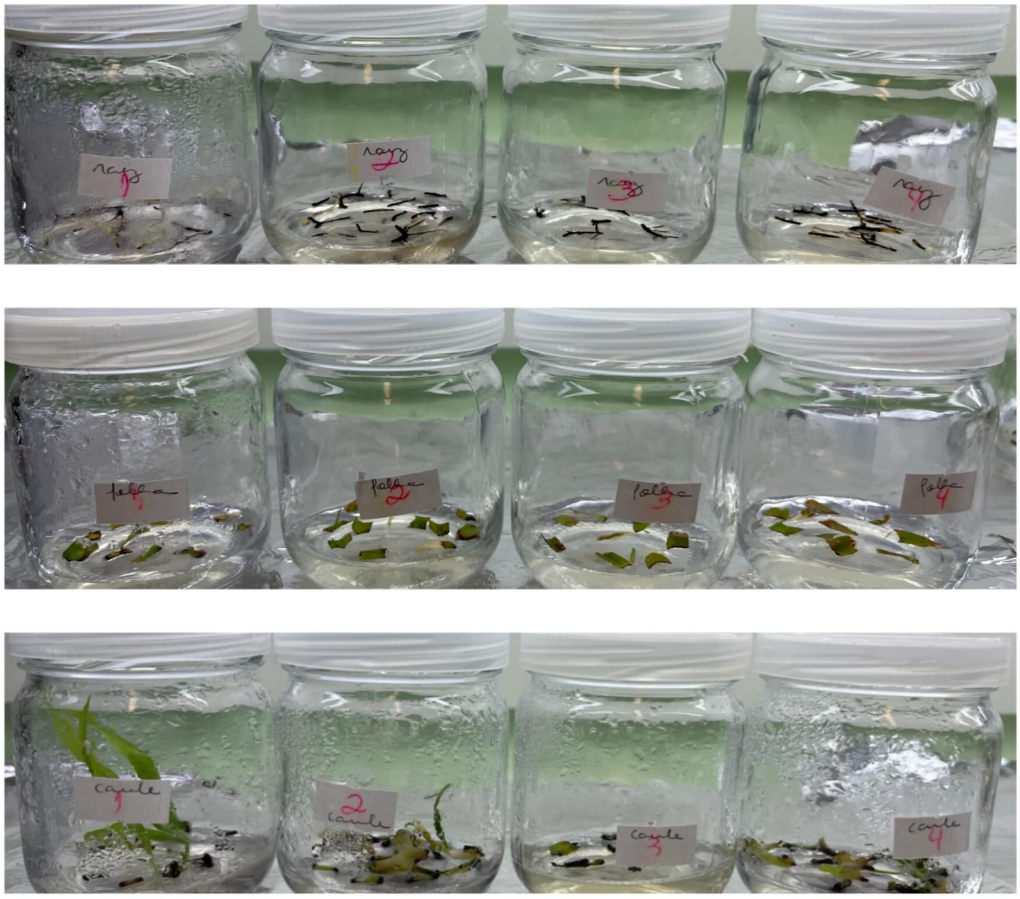
Figura 3. Separação de folhas, raizes e caules

Fonte: Autor.

Após um período de quinze dias da inoculação, observou-se que ocorreu oxidação das raízes, folhas e caules em todos os meios de cultura (Figura 4).

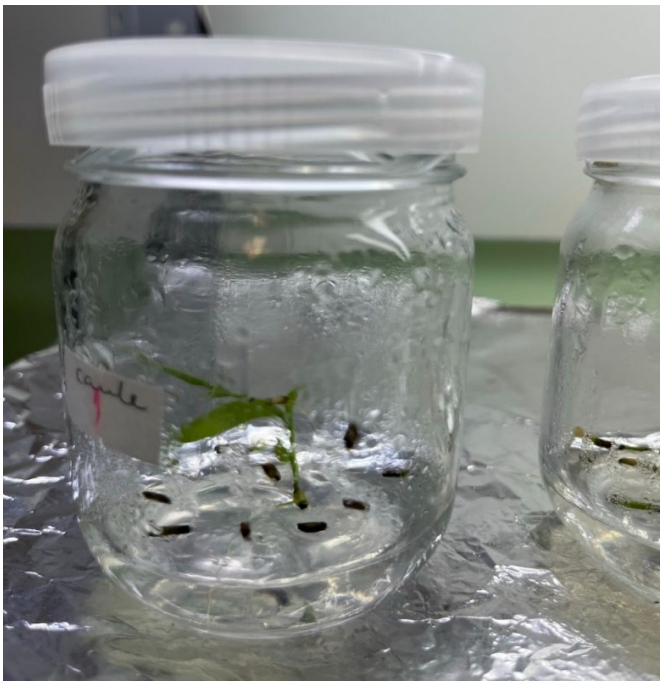
No entanto, a brotação do caule foi observada apenas no meio de cultura T1 (Figura 5). Esses resultados indicam que o meio de cultura T1 foi mais eficiente para promover a brotação dos explantes de caule, enquanto a oxidação foi um fenômeno observado em todos os meios de cultura testados, afetando as raízes, folhas e caules dos explantes.

Figura 4: Oxidação das raizes, folhas e caules



Fonte: Autor.

Figura 5. Brotação a partir de caule em T1

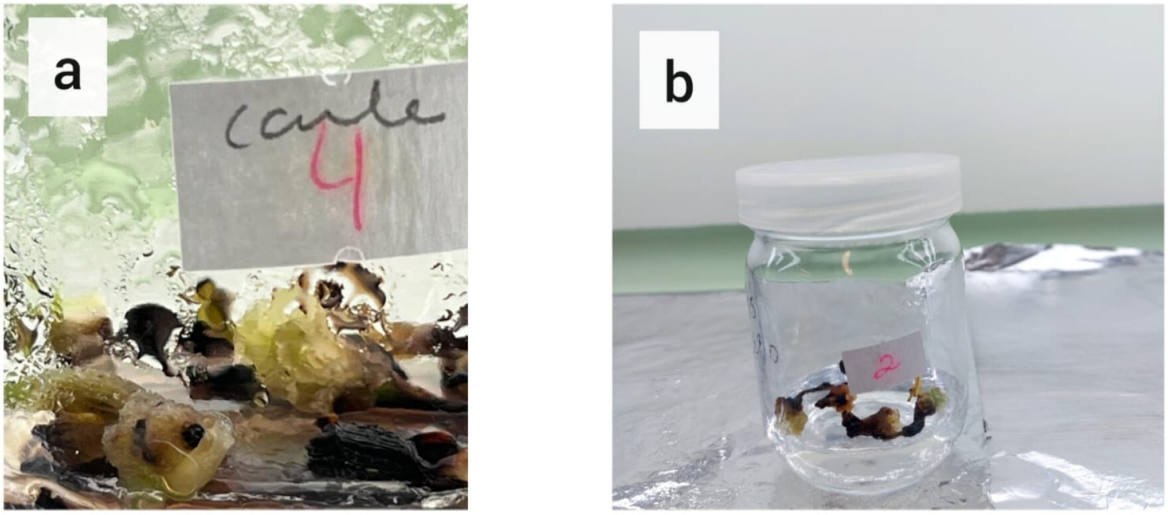


Fonte: Autor.

Após análises posteriores, constatou-se que não houve alterações significativas, exceto a formação de calos nos caules no meio de cultura T4 (Figura 6a).

Com base nessa observação, os calos foram transferidos para o meio T2, que possui uma concentração menor de fitorreguladores (Figura 6b), com a expectativa de que esses calos possam desenvolver novos brotos ao longo do tempo. Essa estratégia foi adotada com o objetivo de promover o crescimento e a diferenciação celular adequados, buscando o surgimento de brotos a partir dos calos formados.

Figura 6. (a) Formação de calos e; (b) calos transferidos para outro meio de cultura



Fonte: Autor.

Desta maneira, foi possivel avaliar que em meio T1 as sementes e explantes conseguem se desenvolver melhor.

Nas observações avaliadas nos meios de cultura T2 a T4 com presença do 2,4 -D notou-se oxidação, porém, em meio T4 teve formação de calos nos explantes de caules. Como observado por Alves e Nascimento (2020), em meio MS + 2 mg.L^{-1} de 2,4-D (ácido diclorofenoxiacético); também houve oxidação dos caules e raízes, sem nenhum surgimento de calos.

Observando o cultivo *in vitro* de Salix (*Salyx humboldtiana* Willd) Santos *et al.*, (2005), notaram que o 2,4-D produzia um efeito tóxico no desenvolvimento da planta. Segundo González (2002) e Bravo (2005) a oxidação das plantas ocorre pela produção de compostos fenólicos.

CONCLUSÃO

A partir dos resultados encontrados, conclui-se que a formulação do meio T1 – 50% dos sais do meio MS, é a mais eficaz para surgimento de brotos quando se usa caule como explante.

O meio T4 – 50% dos sais do meio MS + 2,5mg.L^{-1} de 2,4-D; resultou na formação de calos em explantes de caules.

REFERÊNCIAS

BARRUETO CID, P. *Cultivo in vitro de plantas*. EMBRAPA, 2014. 325p.

BHASKARAN, S.; SMITH, R. Enhanced somatic embryogenesis in *Sorghum* bicolor from shoot tip culture. *In vitro Cellular & Developmental Biology*, Gaithersburg, v. 24, n. 1, p. 65-70, 1988.

DILLON, S. L.; SHAPTER, F. M.; HENRY, R. J.; CORDEIRO, G.; IZQUIERDO, L.; LEE, L. S. Domestication to crop improvement: genetic resources for *Sorghum* and *Saccharum* (Andropogoneae). *Annals of botany*, London, v. 100, n. 5, p. 975–989, 2007.

DOGGETT, H. *Sorghum*. New York: Longmans, 1970. 403 p.

FAO. Disponível em: https://www.fao.org/faostat/en/#country/21. Acesso em: 04 abr.2022.

GAO, J.; XIA, B.; LUO, F.; SUN, S.; PEI, Z.; GUI, Z.; YUAN, Q.; LI, X. Marker-assisted breeding for rf1, a nuclear gene controlling A1 CMS in *sorghum* (*Sorghum* bicolor L. Moench). *Euphytica*, Wageningen, v. 193, n. 3, p. 383–390, 2013.

GUPTA, S.; KHANNA, V.K.; SINGH, R.; GARG, G.K. Strategies for overcoming genotypic limitations of *in vitro* regeneration and determination of genetic components of variability of plant regeneration traits in sorghum. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, Dordrecht, v. 86, n. 3, p. 379–388, 2006.

HOSAKA, G.K. *Estabelecimento de protocolo de cultura de tecidos de Sorghum bicolor*. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2014. 74 p.

INDRA, A.P.; KRISHNAVENI, S. Effect of hormones, explants and genotypes in *in vitro* culturing of *sorghum*. *Journal of Biochemical Technology*, Mumbai, v. 1, n. 4, p. 96–103, 2009.

JOGESWAR, G.; RANADHEER, D.; ANJAIAH, V.; KAVI KISHOR, P.B. High frequency somatic embryogenesis and regeneration in different genotypes of Sorghum bicolor (L.) Moench from immature inflorescence explants. In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant, Columbia, v. 43, n. 2, p. 159–166, 2007.

LIU, G.; GODWIN, I. D. Highly efficient sorghum transformation. *Plant Cell Reports*, Berlin, v. 31, n. 6, p. 999–1007, 2012.

MAHESWARI, M.; JYOTHI LAKSHMI, N.; YADAV, S.K.; VARALAXMI, Y.;VIJAYA LAKSHMI, A.; VANAJA, M.; VENKATESWARLU, B. Efficient plant regeneration from shoot apices of *sorghum*. *Biologia Plantarum*, Praha, v. 50, n. 4, p.741–744, 2006.

MORGADO, L. Sorgo. *In*: KILL, L.H.P.; MENEZES, E.A. *Espécies vegetais exóticas com potencialidades para o semi-árido brasileiro*. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. p. 251–274.

MURASHIGE, T.; SKOOG, F. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *PhysiologiaPlantarum*, Copenhagen, v. 15, n. 3, p. 473-497, 1962.

NGUYEN, T.-V.; THANH THU, T.; CLAEYS, M.; ANGENON, G. Agrobacterium mediated transformation of *sorghum* (*Sorghum* bicolor (L.) Moench) using an improved*in vitro* regeneration system. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, Dordrecht, v. 91, n. 2, p. 155–164, 2007.

PASQUAL, M.; HOFFMANN, A.; RAMOS, J D. *Cultura de tecidos vegetais: tecnologia e aplicações.* Introdução - fundamentos básicos. Lavras-MG: UFLA/FAEPE,1998. 159 p.

PIERIK, R.L.M. *Cultivo In vitro de las plantas superiores*. Madrid: Mundiprensa, 1988

RAGHUWANSHI, A.; BIRCH, R.G. Genetic transformation of sweet *sorghum*. *Plant Cell Reports*, Berlin, v. 29, n. 9, p. 997–1005, 2010.

SCHIMIDT, A. A. P. *Sorgo*. São Paulo: Ícone, 1987. 63 p.

SMITH, C.W.; FREDERIKSEN, R.A. *Sorghum*: origin, history, technology, and production. New York: Wiley, 2000. 824 p.

TABOSA, J. N.; LIMA, G. S.; LIRA, M. A.; TAVARES FILHO, J. J.; BRITO, A .R. M. B. Programa de melhoramento de sorgo e milheto em Pernambuco. *In*: QUEIRÓZ, M.A. de; GOEDERT, C.O.; RAMOS, S.R.R. *Recursos genéticos e melhoramento de plantas para o nordeste brasileiro.* Petrolina: Embrapa Semi-Árido; Brasília: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 1999.

Anexo 1. Composição dos meios nutritivos MS (MURASHIGE; SKOOG, 1962)

		MS 100% ($mg.L^{-1}$)	MS 50% ($mg.L^{-1}$)
Macronutrientes			
KNO3		1650	825
CaCl2*2H2O		1900	950
NH4NO3		440	220
MgSO4*7H2O		370	185
KH2PO4		170	85
Micronutrientes			
H3BO3		6,2	3,1
MnSo4.4H2O		22,3	11,15
ZnSO4.7H2O		8,6	4,3
CoCl2.6H2O		0,025	0,0125
CuSO4.5H2O		0,025	0,0125
Na2MoO4.2H2O		0,25	0,125
KI		0,83	0,415
FeEDTA			
Na2EDTA.2H2O		37,3	18,65
FeSO4.7H2O		27,8	13,9
Vitaminas			
Ácido nicotínico		0,5	0,25
Piridoxina		0,5	0,25
Tiamina		0,1	0,05
Glicina		2,0	1,0
Inositol		100	50
Reguladores Vegetais	BAP	0,2	0,2
	NAA	1,0	1,0
Outros		g/L	g/L
Sacarose		30	30
Phytagel®		2,4	2,4

1 NOGUEIRA, Tainá Caroline. Profissional formada em Gestão Ambiental pela Universidade Anhembi Morumbi, com experiência em pesquisa científica. Atuou na área de entomologia, desenvolvendo estudos voltados à biologia e manejo de insetos. Realizou iniciação científica em cultivo in vitro de sorgo, adquirindo conhecimentos em técnicas laboratoriais e biotecnologia vegetal. Interesse em conservação ambiental, agricultura sustentável e biotecnologia aplicada.

2 NASCIMENTO, Daniela Defavari do. possui graduação em Engenharia Agronômica pela Universidade de São Paulo (1997), graduação em Licenciatura Em Ciências Agrárias pela ESALQ/USP (1998), mestrado em Fisiologia e Bioquímica de Plantas pela ESALQ/USP (2000) e doutorado em Agronomia (Genética e Melhoramento de Plantas) pela ESALQ/USP (2005). Especialista (MBA) em Agronegócios pelo PECEGE/ESALQ/USP (2012). Tem experiência na área de Agronomia e Fermentações, com ênfase em Bioquímica e Biologia Molecular, atuando principalmente nos seguintes temas: desenvolvimento e análise de cervejas especiais, cultura de tecidos, micropropagação de plantas, clonagem gênica, transformação genética de plantas (Tabaco, Arabidopsis, Eucalipto e cana-de-açúcar), análises moleculares. Desde 2010 é professora concursada por prazo indeterminado para as disciplinas: Biotecnologia, Bioetanol e Processos Fermentativos do curso de Graduação em Biocombustíveis; Biotecnologia e Bioquímica de Alimentos do curso de Graduação em Alimentos; e Processos Bioquímicos Fermentativos e Biotecnologia do curso de graduação em Processos Químicos, todos da FATEC Piracicaba "Deputado Roque Trevisan".

Avaliação da sustentabilidade de alternativas da utilização da vinhaça

OLIVEIRA, Nélio de
RAMOS, Kelly da Silva
SILVA, Fábio César da

Resumo

Este trabalho analisa as alternativas de utilização sustentável da vinhaça, um subproduto da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, no setor sucroalcooleiro brasileiro. A pesquisa é fundamentada em uma revisão bibliográfica e utiliza uma metodologia qualitativa para explorar as práticas e tecnologias que possibilitam o aproveitamento da vinhaça com menores impactos ambientais. A primeira etapa envolve a revisão de literatura e coleta de dados sobre as propriedades físico-químicas da vinhaça e suas implicações ambientais. Em seguida, são identificadas e descritas as práticas atuais de manejo e as alternativas tecnológicas, como a fertirrigação e a produção de biogás. Na análise, as informações são organizadas em categorias temáticas, o que possibilita um aprofundamento crítico sobre o uso da vinhaça como recurso econômico e ambientalmente benéfico. Com base na análise, são sugeridas diretrizes para a implementação de práticas de manejo sustentável e uma proposta de modelo de gestão para o setor. Ao final, os resultados apontam para a viabilidade da vinhaça como fertilizante e fonte de energia, incentivando práticas que integrem sustentabilidade ambiental, social e econômica no agronegócio. Espera-se que esta pesquisa contribua para a adoção de políticas públicas e práticas empresariais voltadas à gestão responsável de resíduos e ao fortalecimento da sustentabilidade no setor.

Palavras-chave: Vinhaça. Sustentabilidade. Setor Sucroalcooleiro.

Abstract

This work analyzes sustainable utilization alternatives for vinasse, a by-product of ethanol production from sugarcane, within the Brazilian sugar-energy sector. The research is based on a bibliographic review and uses a qualitative methodology to explore practices and technologies that enable vinasse use with minimal environmental impact. The first stage involves a literature review and data collection on the physicochemical properties of vinasse and its environmental implications. Next, current management practices and technological alternatives, such as fertigation and biogas production, are identified and described. In the analysis, information is organized into thematic categories, allowing for a critical examination of vinasse as an economically and environmentally beneficial resource. Based on the analysis, guidelines are suggested for implementing sustainable management practices and a management model proposal for the sector. Finally, the results point to the viability of vinasse as a fertilizer and energy source, promoting practices that integrate environmental, social, and economic sustainability in agribusiness. It is hoped that this research will contribute to the adoption of public policies and business practices focused on responsible waste management and strengthened sustainability in the sector.

Keywords: Vinasse. Sustainability. Sugar-Energy Sector.

Resumen

Este trabajo analiza las alternativas de uso sostenible de la vinaza, un subproducto de la producción de etanol a partir de la caña de azúcar, en el sector sucroenergético brasileño. La investigación se basa en una revisión bibliográfica y utiliza una metodología cualitativa para explorar las prácticas y tecnologías que permiten aprovechar la vinaza con menores impactos ambientales. La primera etapa implica la revisión de la literatura y la recopilación de datos sobre las propiedades físico-químicas de la vinaza y sus implicaciones ambientales. A continuación, se identifican y describen las prácticas actuales de manejo y las alternativas

tecnológicas, como la fertirrigación y la producción de biogás. En el análisis, la información se organiza en categorías temáticas, lo que permite una profundización crítica sobre el uso de la vinaza como recurso económico y ambientalmente beneficioso. Con base en el análisis, se sugieren directrices para la implementación de prácticas de manejo sostenible y se propone un modelo de gestión para el sector. Al final, los resultados apuntan a la viabilidad de la vinaza como fertilizante y fuente de energía, promoviendo prácticas que integren la sostenibilidad ambiental, social y económica en la agroindustria. Se espera que esta investigación contribuya a la adopción de políticas públicas y prácticas empresariales enfocadas en la gestión responsable de residuos y en el fortalecimiento de la sostenibilidad en el sector.

Palabras-clave: Vinaza. Sostenibilidad. Sector sucroenergético.

INTRODUÇÃO

A crescente demanda mundial por fontes de energia renováveis e alternativas aos combustíveis fósseis tem impulsionado a busca por processos produtivos mais sustentáveis. Nesse contexto, o Brasil assume um papel de destaque na produção de biocombustíveis, em especial o etanol derivado da cana-de-açúcar, um dos setores mais produtivos e estratégicos da matriz energética nacional. Durante a produção de etanol, no entanto, gera-se uma quantidade significativa de vinhaça, um subproduto líquido rico em matéria orgânica e nutrientes, mas que, quando mal gerido, pode causar sérios impactos ambientais, como a contaminação de solos e águas subterrâneas. Por isso, faz-se necessário investigar e avaliar alternativas sustentáveis para o uso da vinhaça, visando minimizar seus riscos ambientais e explorar seu potencial como recurso econômico.

A escolha deste tema é justificada pela importância econômica e ambiental do setor sucroalcooleiro no Brasil, país que figura como um dos maiores produtores de etanol no cenário global. Considerando o impacto ambiental associado ao descarte inadequado da vinhaça, é essencial promover práticas que contribuam para um desenvolvimento sustentável, alinhando-se às políticas de proteção ambiental e responsabilidade social.

A vinhaça possui potencial para ser utilizada como fertilizante e na produção de biocombustíveis como o biogás, o que a torna um recurso valioso que pode agregar valor ao processo produtivo de etanol. Dessa forma, a pesquisa busca fornecer diretrizes para uma gestão ambientalmente responsável da vinhaça, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais negativos e para a valorização econômica desse subproduto.

A relevância do tema reside na necessidade de práticas de manejo ambiental que preservem a qualidade dos recursos naturais e promovam o uso racional dos subprodutos industriais. Ao investigar as diferentes alternativas para o aproveitamento da vinhaça, este trabalho contribui para o desenvolvimento de soluções que se alinham aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente os que tratam da gestão responsável de resíduos e da proteção da biodiversidade. Além disso, o estudo é relevante para pequenas e médias indústrias, que podem implementar práticas de manejo da vinhaça com baixo custo e alto valor agregado, promovendo a economia circular no setor agroindustrial.

O objetivo geral deste estudo é avaliar a sustentabilidade das alternativas de utilização da vinhaça, visando identificar práticas que maximizem seus benefícios e minimizem os impactos ambientais, sociais e econômicos no contexto da produção de etanol.

Tem-se como objetivos específicos: analisar as características químicas e físicas da vinhaça para entender seu potencial como fertilizante e fonte de energia; Identificar e avaliar as práticas atuais de manejo da vinhaça na indústria sucroalcooleira, destacando suas implicações ambientais; Investigar alternativas tecnológicas para o aproveitamento da vinhaça, como a produção de biogás, compostagem e bioprodutos; Propor diretrizes para um manejo sustentável da vinhaça, integrando práticas eficazes de gestão ambiental e responsabilidade social; realizar um estudo de caso sobre experiências bem-sucedidas na utilização da vinhaça, buscando exemplos que possam servir como referência para a adoção de práticas sustentáveis.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Vinhaça como Recurso Sustentável

O sistema de agronegócio é de fundamental importância para o Brasil, pois está diretamente envolvido no processo de crescimento e desenvolvimento do país. Anualmente, esse setor mostra um aumento significativo na produtividade e nas exportações, resultando em ganhos econômicos que o tornam indispensável para a economia nacional. Dados da Conferência das Nações Unidas para o Comércio e Desenvolvimento (UNCTAD) indicam que, em 2027, o Brasil se tornará o maior país agrícola do mundo. Dentro do agronegócio, a cana-de-açúcar se destaca por sua ampla produção e uso no Brasil, uma vez que se adapta facilmente aos climas do território nacional. Um exemplo dessa alta produção ocorreu na safra de 2019/20, que foi estimada em 615.978,9 mil toneladas. Assim, essa cultura é crucial para o cenário econômico do país.

Além disso, a relevância da cana-de-açúcar é ressaltada pelo fato de o Brasil ser o segundo maior produtor mundial de etanol, que é obtido através do processamento dessa planta. Segundo a CONAB, em 2020, o país produziu 30,31 bilhões de litros de etanol. Contudo, é importante observar que para cada litro de etanol produzido, em média, são gerados de dez a treze litros de vinhaça. Este subproduto da produção de etanol, conhecido regionalmente como vinhoto e restilo, é o resultado da destilação do vinho proveniente da fermentação do melaço ou do caldo de cana. A vinhaça é caracterizada pela coloração castanho escuro, resultante do pigmento melanoidina. Sua composição básica inclui 7% de sólidos em suspensão, representados por compostos minerais e orgânicos, e 93% de fase líquida. Além disso, possui um alto teor de nitrogênio, potássio, açúcares e compostos fenólicos, bem como concentrações menores de cálcio, magnésio, enxofre e fósforo (Paula, *et al.*, 2022).

De acordo com a CONAB, a produção média de vinhaça no Brasil em 2019 foi de aproximadamente 303,1 bilhões de toneladas. Este resíduo tem um elevado potencial poluidor, cerca de cem vezes maior que o esgoto doméstico. Isso se deve a diversos fatores, como o baixo

pH (4,3), o alto índice de DBO (que varia de 20.000 a 35.000 mg L^{-1}) e o elevado índice de DQO (23.801 mg L^{-1}). Outro fator que provoca sérios danos ao meio ambiente é a alta temperatura da vinhaça ao sair dos aparelhos de destilação, que varia de 85 °C a 90 °C, podendo causar grandes danos à flora, fauna e aos microrganismos quando lançada em rios ou no solo. A melanoidina, um biopolímero presente na vinhaça, possui natureza recalcitrante e propriedades antioxidantes, sendo tóxica para alguns microrganismos envolvidos nos processos de tratamento biológico de efluentes (Paula, *et al.*, 2022).

Para evitar os danos mencionados, a adoção de medidas sustentáveis é essencial. A sustentabilidade pode ser alcançada quando todos os aspectos de seu tripé — social, econômico e ambiental — são contemplados. Além disso, a sustentabilidade tem como objetivo promover um aumento significativo na atividade econômica através do uso eficiente dos recursos, minimizando a geração de emissões prejudiciais ao meio ambiente.

A vinhaça, um subproduto gerado durante a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, apresenta desafios significativos para a sustentabilidade ambiental e econômica do agronegócio brasileiro. Embora a produção de etanol seja uma fonte de energia renovável e promissora, a gestão inadequada da vinhaça pode acarretar sérios problemas de poluição e degradação ambiental. Assim, a avaliação de alternativas sustentáveis para a utilização da vinhaça torna-se essencial para mitigar seus impactos negativos e maximizar seu potencial como recurso (Paula, *et al.*, 2022). De acordo com Paula *et al.* (2022, [s/p.]):

> A vinhaça, quando adequadamente tratada e reaproveitada, pode transformar-se de passivo ambiental em ativo econômico. Sua utilização como biofertilizante e fonte energética contribui diretamente para a redução de custos, mitigação de impactos ambientais e promoção de práticas sustentáveis alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

A vinhaça é composta por água, sólidos suspensos, açúcares não fermentados, e nutrientes, incluindo nitrogênio, potássio e fósforo, o que a torna um material potencialmente valioso para a agricultura (Silva *et al.*, 2019). Sua composição química varia conforme o processo de produção do etanol e as características da matéria-prima utilizada, mas geralmente, contém cerca de 93% de água e 7% de sólidos em suspensão (Christofoletti et al., 2013). Em 2019, a produção de vinhaça no Brasil foi estimada em aproximadamente 303,1 bilhões de toneladas, destacando a necessidade urgente de métodos adequados de gestão e utilização desse resíduo (CONAB, 2019).

A disposição inadequada da vinhaça pode resultar em sérios impactos ambientais, como a contaminação de corpos d'água e do solo. A vinhaça possui um alto potencial poluidor, com uma DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) que varia de 20.000 a 35.000 mg L^{-1}, o que é cerca de

cem vezes maior do que o esgoto doméstico (Seixas *et al.,* 2016). O lançamento direto da vinhaça em cursos d'água pode levar à eutrofização, um processo que causa a proliferação de algas, resultando na degradação da qualidade da água e na morte de organismos aquáticos (Silva, 2014). Além disso, a alta temperatura da vinhaça ao sair dos destiladores, que pode chegar a 90 °C, apresenta riscos adicionais à flora e fauna locais (Silva, 2014).

A utilização sustentável da vinhaça pode ser alcançada por meio de diversas alternativas que visam não apenas reduzir seu impacto ambiental, mas também aproveitar suas propriedades benéficas.

A vinhaça pode ser utilizada como fertilizante, pois é rica em nutrientes essenciais para as plantas. Sua aplicação no solo pode aumentar a fertilidade e melhorar a qualidade do solo, contribuindo para a produção agrícola sustentável. Estudos indicam que a aplicação de vinhaça em cultivos pode resultar em aumentos significativos na produtividade, principalmente em culturas como cana-de-açúcar, milho e feijão (Oliveira *et al.,* 2020).

Outra alternativa viável é a conversão da vinhaça em biocombustíveis, como biogás e bioetanol. O processo de digestão anaeróbica da vinhaça pode gerar biogás, que pode ser utilizado como fonte de energia para a produção de eletricidade ou calor, além de reduzir a carga poluente do resíduo (Silva *et al.*, 2019).

Tecnologias de tratamento, como processos biológicos e físicos-químicos, podem ser empregadas para minimizar os efeitos poluentes da vinhaça antes de seu descarte ou reutilização. O uso de reatores anaeróbicos e lagunas de estabilização tem mostrado eficácia na redução da DBO e na remoção de nutrientes, tornando a vinhaça menos impactante ao ser lançada no meio ambiente (Lira *et al.*, 2013).

A avaliação da sustentabilidade das alternativas para a utilização da vinhaça é crucial para a promoção de práticas agrícolas responsáveis e a proteção ambiental. Compreender as características e impactos desse subproduto é fundamental para desenvolver soluções que beneficiem tanto a economia quanto o meio ambiente. A adoção de práticas sustentáveis não apenas contribui para a mitigação dos impactos negativos da vinhaça, mas também potencializa seu uso como recurso valioso no setor agroindustrial, promovendo um ciclo de produção mais sustentável e equilibrado.

Com isso, observa-se que A vinhaça apresenta uma ampla gama de opções para sua utilização, com destaque para a produção de biogás e a fertirrigação. Este resíduo se revela extremamente sustentável, pois suas aplicações podem trazer benefícios tanto econômicos quanto sociais, além de favorecer o meio ambiente. Pequenos e médios produtores podem tirar proveito da vinhaça como uma fonte adicional de renda. Adicionalmente, ela pode ser utilizada na

alimentação animal e na geração de biogás em biodigestores caseiros, bem como na adubação de hortas. Outro aspecto significativo é a melhoria na qualidade de vida, já que o acesso a um ambiente mais limpo e a novas fontes de renda pode resultar em um aumento considerável na qualidade de vida social (Paula, *et al.*, 2022).

Portanto, o uso da vinhaça para essas finalidades se alinha aos dois primeiros pilares da sustentabilidade, englobando os aspectos econômico e social. No que diz respeito ao impacto ambiental, a utilização deste resíduo na produção de biogás e na fertirrigação impede seu descarte inadequado no solo e na água. Isso ocorre porque a utilização da vinhaça requer que ela passe por processos de tratamento ou diluição, que reduzem significativamente sua carga poluidora, tornando-a menos nociva ao meio ambiente.

2. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho foi estruturada para investigar alternativas sustentáveis de uso da vinhaça, com o objetivo de mitigar seus impactos ambientais e otimizar seu potencial econômico no setor sucroalcooleiro. A pesquisa baseou-se em uma abordagem qualitativa, utilizando revisão bibliográfica para fundamentar teoricamente o estudo e análise de conteúdo para estruturar e organizar os dados de maneira crítica e reflexiva. Cada etapa metodológica foi pensada para responder aos objetivos específicos, desde a análise das características da vinhaça até a proposição de diretrizes sustentáveis para sua gestão.

Primeiramente, realizou-se uma revisão bibliográfica com base em artigos científicos, livros e documentos técnicos publicados entre 2013 e 2024, nas bases *Scielo, Scopus* e *Google Scholar*. Essa revisão permitiu o levantamento de dados em artigos científicos, livros, relatórios e documentos técnicos de instituições renomadas, focando em publicações que abordassem o uso da vinhaça como fertilizante e sua aplicação em processos de biogás. Essa etapa foi fundamental para entender as propriedades do resíduo e as questões ambientais relacionadas ao seu descarte inadequado. Foram priorizadas fontes recentes e reconhecidas na área de biocombustíveis e sustentabilidade, permitindo uma base sólida de informações e a construção de um referencial teórico consistente.

Em seguida, identificaram-se e avaliaram-se as práticas de manejo da vinhaça no setor sucroalcooleiro. Com o objetivo de explorar os métodos atuais de utilização do resíduo, essa etapa envolveu uma análise detalhada das alternativas tecnológicas, como a fertirrigação, compostagem e produção de biogás. Foram investigadas as implicações econômicas e ambientais dessas práticas, analisando-se estudos de caso, relatórios técnicos e literatura especializada que apresentassem

abordagens inovadoras e seus impactos. Esse levantamento possibilitou a compreensão das práticas já empregadas e a identificação de lacunas na gestão da vinhaça.

Após a análise das práticas de manejo, a metodologia seguiu com a sistematização dos dados coletados, organizando-os em categorias temáticas que representavam as diferentes abordagens sustentáveis para o uso da vinhaça. Essa categorização facilitou o entendimento das interações entre os fatores ambientais, sociais e econômicos, criando uma visão abrangente e crítica do tema. A análise de conteúdo foi empregada para interpretar qualitativamente os achados, relacionando-os aos objetivos propostos e ao contexto da sustentabilidade no setor agroindustrial.

Além das etapas metodológicas anteriormente descritas, este estudo incorporou a técnica de análise de conteúdo para a construção do Quadro 1, que compara as principais alternativas sustentáveis de uso da vinhaça.

A escolha por essa técnica se baseia na obra de Laurence Bardin (2011), referência central nesse campo, que define a análise de conteúdo como um conjunto de procedimentos sistemáticos e objetivos destinados à descrição e interpretação do conteúdo das mensagens, com vistas à produção de inferências válidas e significativas sobre o contexto em que foram produzidas. Com base nesse referencial, foram extraídas e categorizadas, a partir da literatura revisada, informações referentes à viabilidade técnica, viabilidade econômica, impacto ambiental e complexidade operacional de cada alternativa analisada.

A sistematização desses dados permitiu a classificação qualitativa das alternativas (alta, média ou baixa), considerando a frequência, a coerência e o grau de aprofundamento com que essas características foram discutidas nos textos consultados. A aplicação da análise de conteúdo possibilitou, portanto, uma organização rigorosa e fundamentada das informações, favorecendo a elaboração de um quadro comparativo que resume, de forma clara e crítica, os aspectos mais relevantes para a avaliação da sustentabilidade no reaproveitamento da vinhaça.

Adicionalmente, a análise de viabilidade econômica, tecnológica e ambiental baseou-se nos critérios definidos por Cruz *et al.* (2013), que propuseram uma estrutura de avaliação dividida em quatro dimensões: i) Viabilidade Técnica, definida como a capacidade da tecnologia funcionar adequadamente nas condições locais de operação; ii) Viabilidade Econômica, relacionada ao custo-benefício da alternativa e ao retorno do investimento gerado; iii) Impacto Ambiental, que diz respeito à redução de poluentes e ao uso sustentável dos recursos naturais; e iv) Complexidade Operacional, que mensura o nível de conhecimento necessário, bem como a facilidade de implantação e execução das práticas analisadas. Esses critérios foram fundamentais para a construção do Quadro 1 e permitiram uma análise comparativa estruturada e consistente, alinhada aos objetivos da pesquisa.

Por fim, com base nas informações analisadas, foram sugeridas diretrizes para um manejo sustentável da vinhaça no setor sucroalcooleiro. Essas diretrizes buscaram integrar práticas de responsabilidade social, economia circular e preservação ambiental. A construção dessas orientações baseou-se nos achados das etapas anteriores, com o intuito de propor um modelo de gestão que incentive o uso responsável da vinhaça e minimize seus impactos negativos.

Essa metodologia de análise multicritério, permitiu uma abordagem abrangente, ponderada e fundamentada sobre o tema, possibilitando a análise crítica das alternativas de utilização sustentável da vinhaça. Ao final, o estudo proporcionou uma visão completa e atualizada sobre o papel desse subproduto na matriz energética e agrícola brasileira, contribuindo para o desenvolvimento de políticas e práticas empresariais mais sustentáveis e alinhadas com os objetivos de desenvolvimento sustentável.

3. RESULTADOS e DISCUSSÃO

3.1 Soluções Sustentáveis para o Uso da Vinhaça

O uso sustentável da vinhaça, subproduto da produção de etanol da cana-de-açúcar, apresenta um potencial significativo para reduzir os impactos ambientais do setor sucroalcooleiro, promovendo práticas que atendem às diretrizes de sustentabilidade e valorização de resíduos. Estudos recentes mostram que, devido ao seu alto teor de nutrientes como potássio, nitrogênio e matéria orgânica, a vinhaça pode ser reaproveitada como fertilizante, gerando benefícios tanto ambientais quanto econômicos.

A vinhaça é amplamente utilizada na prática da fertirrigação, uma técnica que consiste na aplicação de nutrientes via irrigação, enriquecendo o solo e melhorando a produtividade das lavouras. Segundo a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA), o uso da vinhaça como fertilizante orgânico permite uma redução de até 70% na necessidade de fertilizantes químicos nas plantações de cana, reduzindo custos e minimizando a contaminação do solo e dos lençóis freáticos. Segundo dados divulgados pela União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA, 2023, [s/p.]):

> A aplicação de vinhaça por meio da fertirrigação tem permitido reduções médias de até 70% no uso de fertilizantes químicos nas lavouras de cana-de-açúcar. Além disso, os produtores relatam ganhos na retenção de umidade do solo e melhoria na estrutura física, o que contribui para o aumento da produtividade agrícola.

Essa prática também contribui para a melhoria das propriedades físico-químicas do solo, como o pH e a capacidade de retenção de água, promovendo uma agricultura mais sustentável e economicamente vantajosa para os produtores rurais Produção de Biogás

Outra alternativa promissora é o uso da vinhaça para a produção de biogás. Estudos indicam que o aproveitamento da vinhaça em biodigestores anaeróbicos gera biogás rico em metano, que pode ser utilizado como fonte de energia renovável. Uma análise da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) apontou que, se 50% da vinhaça gerada no Brasil fosse destinada à produção de biogás, seria possível abastecer cerca de 3 milhões de residências com energia elétrica. De acordo com relatório da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2022, [s/p]):

> Estudos de viabilidade energética apontam que a utilização de apenas 50% da vinhaça produzida no Brasil permitiria a geração de biogás suficiente para suprir aproximadamente 3 milhões de residências com energia elétrica, reduzindo em até 20% a emissão de CO_2 do setor sucroalcooleiro.

Além disso, a produção de biogás reduz a quantidade de vinhaça descartada e diminui as emissões de gases de efeito estufa (GEE), alinhando-se às metas de descarbonização estabelecidas pelo setor sucroalcooleiro.

Apesar de menos comum, a vinhaça pode ser utilizada como suplemento na alimentação animal, desde que passe por um processo de tratamento para eliminar compostos indesejáveis. Essa alternativa tem se mostrado viável em pequenas proporções, uma vez que o subproduto possui alta carga orgânica e alguns nutrientes essenciais. A empresa de pesquisa agropecuária EMBRAPA destacou que, em sistemas controlados, a vinhaça pode ser integrada à dieta de bovinos, contribuindo para a redução de custos de alimentação e para o uso circular de recursos na pecuária.

A vinhaça também pode ser utilizada em processos de tratamento de água, auxiliando na remoção de poluentes orgânicos de efluentes industriais. Estudos indicam que a vinhaça possui características que a tornam eficiente na bioabsorção de metais pesados e outros poluentes em águas residuais. Em experimentos realizados pela Universidade de São Paulo (USP), a aplicação de vinhaça em sistemas de tratamento de águas residuais resultou em uma redução de até 80% de compostos tóxicos, além de diminuir a carga poluente em corpos hídricos próximos às áreas de cultivo.

A vinhaça contém compostos bioquímicos que podem servir como precursores para a produção de ácido láctico, ácido acético e etanol de segunda geração. Esses produtos têm aplicações em indústrias de alimentos, cosméticos e energia. Empresas de biotecnologia como Raízen e GranBio já estão investindo em tecnologias para transformar a vinhaça em produtos

químicos de alto valor agregado. Essas iniciativas não apenas promovem o uso sustentável do subproduto, mas também geram novas fontes de receita para o setor (Silva, Freire, 2024).

Do ponto de vista ambiental, o uso sustentável da vinhaça reduz a quantidade de resíduos descartados no ambiente e diminui a necessidade de recursos naturais. O reaproveitamento da vinhaça evita a contaminação do solo e da água, problema que, segundo o Ministério do Meio Ambiente, poderia comprometer a biodiversidade e a qualidade das águas subterrâneas em regiões de cultivo intensivo de cana-de-açúcar (Silva, Freire, 2024). Além disso, o uso de vinhaça para a produção de biogás ajuda a reduzir a pegada de carbono do setor sucroalcooleiro, contribuindo para as metas de redução de emissões estabelecidas no Acordo de Paris.

Economicamente, a valorização na forma de fertilizante e como fonte de energia reduz os custos operacionais das usinas de açúcar e álcool. Segundo a Confederação Nacional da Agricultura (CNA), a economia gerada com a redução de fertilizantes químicos e com o uso de biogás pode chegar a até 15% dos custos totais de produção. Isso demonstra que a gestão adequada da vinhaça não só promove a sustentabilidade, mas também traz benefícios financeiros para o setor.

Os resultados mostram que a vinhaça possui grande potencial como recurso econômico e ambientalmente sustentável, oferecendo alternativas viáveis para o setor sucroalcooleiro. As práticas de manejo discutidas, como a fertirrigação e a produção de biogás, demonstram que é possível alinhar eficiência econômica com sustentabilidade ambiental (Silva, Freire, 2024). Contudo, a implementação dessas práticas exige investimentos em tecnologia e capacitação técnica, além de políticas públicas que incentivem o uso responsável de subprodutos no agronegócio. A adoção de um modelo de gestão sustentável para a vinhaça poderá consolidar o setor sucroalcooleiro como um exemplo de economia circular no Brasil.

Para facilitar a visualização comparativa das principais alternativas sustentáveis de aproveitamento da vinhaça, elaborou-se o Quadro 1. Nele são apresentados critérios como viabilidade técnica, viabilidade econômica, impacto ambiental e complexidade operacional. A análise dessas variáveis permite compreender quais práticas apresentam maior potencial de aplicação no setor sucroalcooleiro, de forma integrada e sustentável.

Quadro 1 – Comparativo das alternativas sustentáveis para uso da vinhaça

Alternativa	Viabilidade Técnica	Viabilidade Econômica	Impacto Ambiental	Complexidade Operacional
Fertirrigação	Alta	Alta	Moderado	Baixa
Biodigestão para biogás	Média	Alta	Baixo	Alta
Uso na alimentação animal	Baixa	Média	Alto	Média
Produção de biofertilizantes	Média	Alta	Baixo	Média

Fonte: elaborado pelos autores com dados de Paula (2022).

4.2 A análise da viabilidade de alternativas para o uso sustentável da vinhaça

Tais análises envolve múltiplos critérios técnicos, econômicos, ambientais, sociais e de sustentabilidade. Esses aspectos são essenciais para assegurar que as soluções propostas não apenas tratem o resíduo de forma eficiente, mas também ofereçam benefícios econômicos e sociais, contribuindo para a sustentabilidade em longo prazo.

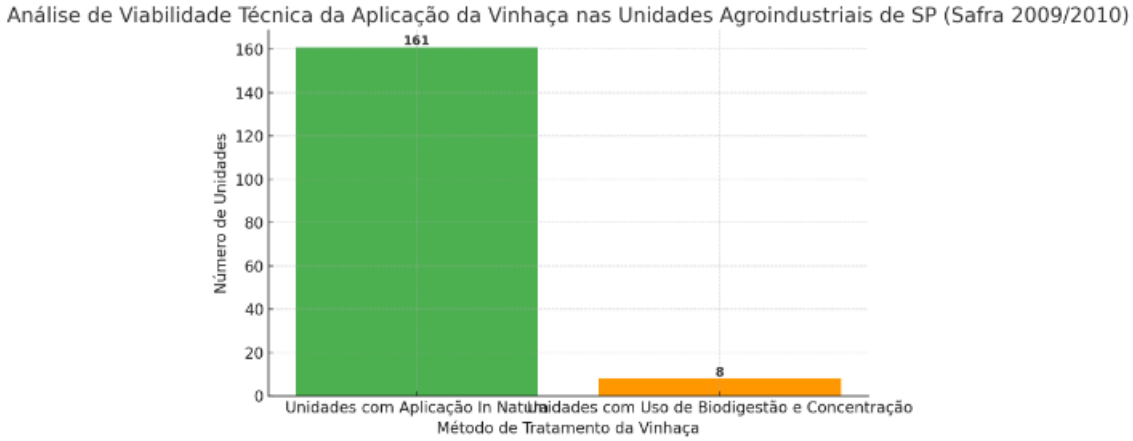
Um dos primeiros critérios a ser considerado é a viabilidade técnica das alternativas propostas, considerando-se: i) adaptação local da tecnologia é adequada para as condições locais, incluindo clima, solo e infraestrutura, ii) eficiência da tecnologia é capaz de processar a vinhaça de forma eficiente e eficaz, e iii) confiabilidade, se a tecnologia é confiável e apresenta poucos problemas operacionais. Isso inclui a avaliação das tecnologias disponíveis para o tratamento da vinhaça, como sistemas de biodigestão para a produção de biogás ou processos de evaporação e filtragem para criar biofertilizantes. A escolha da tecnologia ideal depende de fatores como a capacidade de processamento, eficiência na remoção de contaminantes e compatibilidade com a infraestrutura já existente. A facilidade de implementação é outro aspecto técnico importante (CETESB, 2015), pois envolve a complexidade dos processos e a necessidade de adaptação ou modernização dos equipamentos. Esse critério afeta diretamente o custo e o tempo de instalação das alternativas (Cruz *et al.*, 2013).

Em estudo feito por Cruz *et al.*, (2013), já apontam para uma análise da viabilidade técnica da aplicação da vinhaça em unidades agroindustriais no estado de São Paulo, onde, durante a safra de 2009/2010 observa-se que, entre as 165 unidades participantes do Protocolo Agroambiental, 161 (97,6%) utilizam a fertirrigação in natura, enquanto apenas 8 unidades (4,8%) adotam tecnologias mais avançadas, como biodigestão e concentração. Conforme observado por Cruz *et al.* (2013):

> Entre as 165 unidades agroindustriais participantes do Protocolo Agroambiental de São Paulo, na safra 2009/2010, observou-se que 97,6% ainda utilizavam a fertirrigação in natura, enquanto somente 4,8% adotavam técnicas mais avançadas como a biodigestão ou a concentração térmica da vinhaça. Este dado evidencia a baixa adesão às tecnologias sustentáveis, mesmo diante de seus reconhecidos benefícios.

Isso evidencia que, apesar de a fertirrigação ser amplamente aceita e respeitando as normas ambientais da CETESB (2015), há baixa adoção de métodos que poderiam agregar valor e sustentabilidade ao processo, como o uso de biogás para energia (Araujo *et al.*, 2019) e biofertilizantes (Gráfico 01).

Gráfico 1. Análise técnica de viabilidade da vinhaça em usinas paulistas

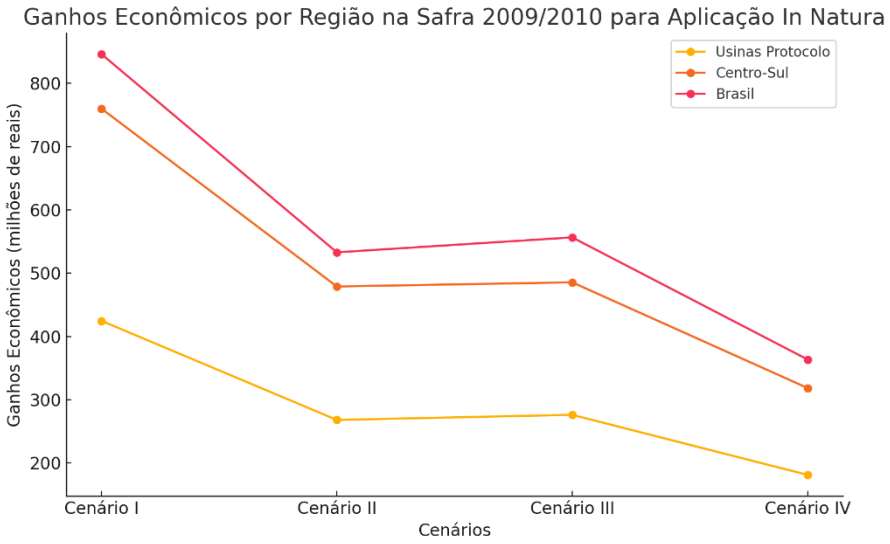


Fonte: elaborado pelos autores.

A viabilidade econômica é essencial para determinar se as alternativas de uso da vinhaça são financeiramente sustentáveis. É necessário calcular os custos iniciais de investimento, incluindo aquisição e instalação de equipamentos, bem como os custos operacionais recorrentes, como manutenção e consumo de energia. Um aspecto crucial é a análise do retorno sobre investimento (ROI), que considera o potencial de geração de receita com produtos derivados, como biogás e fertilizantes. Além disso, uma análise de mercado pode revelar o potencial de aceitação e venda desses produtos, garantindo que haja demanda suficiente para justificar o investimento. Esse critério permite avaliar a competitividade da alternativa e sua viabilidade financeira a longo prazo, como destacaram Cruz *et al.*, (2013), Araujo, (2017) e Araujo *et al.* (2019).

Em pesquisa feita pelos autores, demonstra que os cenários com adubação complementar (Cenário II e Cenário IV) resultam em menores ganhos econômicos comparados aos cenários sem adubação complementar (Cenário I e Cenário III), destacando a influência da adubação complementar nos custos e na produtividade das áreas fertirrigadas (CETESB, 2015). O Cenário I apresenta o maior ganho econômico para todas as regiões, enquanto o Cenário IV apresenta o menor, refletindo a significativa redução nos lucros ao aplicar maiores volumes de vinhaça com adubação adicional (Gráfico 02).

Gráfico 2. Análise econômica para aplicação de vinhaça *in natura* em usinas paulistas.



Fonte: elaborado pelos autores.

O impacto ambiental das alternativas é um critério determinante, pois o objetivo principal do tratamento da vinhaça é reduzir seu efeito poluente. A análise ambiental envolve a avaliação dos efeitos de cada método proposto sobre o solo, a água (CETESB, 2015) e o ar, com especial atenção à redução de poluentes e ao uso sustentável de recursos naturais (Silva, Freire, 2024). O cumprimento das regulamentações ambientais locais e nacionais é indispensável, uma vez que a conformidade legal não só evita penalidades como também fortalece a imagem ambiental da empresa (Elia Neto, 2009). Soluções que promovem a reutilização de resíduos, como a reciclagem de nutrientes presentes na vinhaça, têm grande potencial de contribuir positivamente para o meio ambiente (Cruz *et al.*, 2013; Dalri, 2014).

A sustentabilidade das alternativas envolve um olhar abrangente sobre o ciclo de vida dos produtos gerados, desde a produção até o descarte. O objetivo é minimizar os impactos negativos em cada etapa e assegurar que os produtos derivados, como o biogás ou biofertilizantes, tragam benefícios duradouros ao meio ambiente. A possibilidade de recuperar nutrientes e outros componentes presentes na vinhaça por meio de processos de reciclagem é uma abordagem importante, pois promove a economia circular e reduz a necessidade de insumos externos. Esse aspecto de sustentabilidade também amplia o uso da vinhaça como recurso renovável, reduzindo os impactos ambientais de longo prazo (Cruz *et al.*, 2013; Araujo, 2017; Araujo *et al*, 2019).

A flexibilidade e escalabilidade das soluções são essenciais para adaptar as alternativas a diferentes contextos de produção, como variações no volume de vinhaça gerado ou alterações na demanda do mercado. Soluções flexíveis permitem que o processo seja ajustado rapidamente,

enquanto a escalabilidade garante que a tecnologia possa crescer conforme aumentam as necessidades de produção (Araujo *et al* ,2019). Esse critério é importante para assegurar que a tecnologia adotada seja adaptável a futuras mudanças, evitando a obsolescência e aumentando sua vida útil e aplicabilidade (Cruz *et al.*, 2013). De acordo com Araujo, (2017) e Araujo *et al* (2019), destacam que a escalabilidade da unidade agroindustrial interfere na escolha, observar que o uso de vinhaça viável para geração de eletricidade está restrito a produtores de médio e grande porte.

A avaliação das alternativas tecnológicas requer o estabelecimento de critérios objetivos que orientem sua aplicação prática. O Quadro 2 resume os principais critérios considerados neste estudo — viabilidade técnica, econômica, ambiental e operacional — com base na literatura especializada. A inclusão desses critérios auxilia na construção de uma análise ponderada mais sistemática e alinhada aos objetivos da sustentabilidade no setor agroindustrial.

Quadro 2 – Critérios de avaliação das alternativas tecnológicas

Critério	Descrição	Importância	Parâmetros
Viabilidade Técnica	Capacidade da tecnologia funcionar nas condições locais	Alta	- Vinhaça: Características e Utilização([1]) - Tecnologias para Utilização de Vinhaça([2])
Viabilidade Econômica	Custo-benefício e retorno do investimento	Alta	- Análise Econômica da Utilização de Vinhaça ([2]) - Avaliação Econômica de Tecnologias para Utilização de Vinhaça
Impacto Ambiental	Redução de poluentes e uso sustentável dos recursos	Alta	Controle e redução de poluentes e ao uso sustentável dos recursos naturais([3]) Impacto Ambiental da Utilização de Vinhaça ([1]) Avaliação de Impacto Ambiental de Tecnologias para Utilização de Vinhaça ([4])
Complexidade Operacional	Nível de conhecimento e estrutura exigidos	Média	Nível de conhecimento necessário, bem como a facilidade de implantação e execução das práticas analisadas([3]) Conhecimento Operacional: requisitos de infraestrutura e treinamento([2])

Fonte: elaborado pelo autor (2025) com base em fontes como: [1]Embrapa; [2] ANEEL, (2022); [3]CRUZ et al.,(2013); [4]CETESB (2015).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa apresentou uma análise detalhada sobre as alternativas sustentáveis para o aproveitamento da vinhaça, subproduto da produção de etanol, no setor sucroalcooleiro brasileiro. A vinhaça, apesar de ser um resíduo de alto potencial poluente, possui características que a tornam um recurso valioso, tanto no aspecto ambiental quanto no econômico. A partir dos dados levantados, ficou evidente a importância de práticas de manejo que possam minimizar os impactos ambientais e maximizar o uso econômico desse subproduto, promovendo uma abordagem que se alinha aos princípios da sustentabilidade.

Ao longo do estudo, identificou-se que práticas como a fertirrigação e a biodigestão anaeróbica, para produção de biogás, são alternativas promissoras que já apresentam resultados positivos no setor. A fertirrigação, por exemplo, não apenas reduz o uso de fertilizantes químicos, mas também contribui para a melhoria das propriedades do solo e aumenta a produtividade agrícola. Além disso, a produção de biogás a partir da vinhaça apresenta-se como uma solução viável para geração de energia renovável, o que contribui para a diminuição da dependência de fontes energéticas tradicionais e para a redução das emissões de gases de efeito estufa. No entanto, esses métodos ainda requerem investimentos tecnológicos e capacitação técnica para serem amplamente adotados.

Outro ponto destacado na pesquisa foi a viabilidade econômica dessas alternativas. Verificou-se que, além de reduzirem custos operacionais, práticas como a fertirrigação e a produção de biogás podem gerar economia no longo prazo, o que demonstra o potencial da vinhaça como um recurso rentável e sustentável. A adoção de tecnologias de tratamento e reciclagem de resíduos, além de valorizar o subproduto, também proporciona uma alternativa ambientalmente responsável para o setor sucroalcooleiro, promovendo um modelo de economia circular.

Apesar dos benefícios identificados, desafios permanecem. Entre eles, destacam-se a necessidade de políticas públicas e incentivos que estimulem o uso responsável e sustentável da vinhaça, a fim de tornar viável sua aplicação em larga escala. A escassez de infraestrutura para tratamento de resíduos em algumas regiões também se mostra um empecilho para a implementação de práticas sustentáveis, especialmente para pequenos e médios produtores, que podem não dispor de recursos financeiros e tecnológicos suficientes.

Conclui-se que a gestão adequada da vinhaça é essencial para consolidar o setor sucroalcooleiro como um exemplo de sustentabilidade e inovação. A integração de tecnologias que promovem a reutilização desse subproduto possibilita uma abordagem que beneficia o meio ambiente, a sociedade e a economia. Espera-se que esta pesquisa contribua para a conscientização

e adoção de práticas mais sustentáveis no setor, alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial aqueles voltados à gestão responsável de resíduos e à proteção dos recursos naturais.

Assim, recomenda-se que futuras pesquisas explorem a viabilidade de novas tecnologias e a implementação de políticas específicas para apoiar o uso sustentável da vinhaça. A continuidade desse tipo de estudo é fundamental para promover uma agricultura mais sustentável e fortalecer o compromisso do Brasil com a preservação ambiental e a sustentabilidade no agronegócio.

REFERÊNCIAS

ANEEL. *Relatório Técnico sobre Geração de Energia com Resíduos Orgânicos*, 2022.

ARAUJO, G. J. F. *Análise energética, ambiental, e econômica de biodigestores de circulação interna e concentradores de vinhaça para geração de eletricidade, fertilizantes e créditos de carbono em diferentes cenários econômicos*. 2017. Master Thesis (Master Degree in Business Administration) - Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2017.

ARAUJO, G. J. F.; OLIVEIRA, S. V. W. B.; OLIVEIRA, M. M. B. Economic Analysis of Internal Circulation Biodigesters and Vinasse Concentrators for the Generation of Electricity, Fertilizers, and Carbon Credits in Various Brazilian Economic Scenarios. *Bioenergy Research*, v. 12, p. 1164-1186, 2019.

BRASIL, Companhia Nacional de Abastecimento. *Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar*. Disponível em: www.conab.gov.br. Acesso em: 2019.

CRESWELL, John W**.** *Research Design:* Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches. 4. ed. Thousand Oaks: SAGE Publications, 2014.

CRISTOFOLETTI, Alex P.; FALCÃO, Robson L.; POMPEU, Rafael F. Composição química da vinhaça e seu uso como fertilizante. *Revista Brasileira de Ciência do Solo***,** v. 37, n. 4, 2013.

CETESB, NORMA P4.231/2015 - Vinhaça – critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola. 3. ed. 2ª versão. São Paulo: 2015.

CRUZ, L. F. L.; DUARTE, C. G.; MALHEIROS, T. F.; PIRES, E. C. Análise da viabilidade técnica, econômica e ambiental das atuais formas de aproveitamento da vinhaça: fertirrigação, concentração e biodigestão. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais***,** 2013. Disponível em: https://www.rbciamb.com.br/Publicacoes_RBCIAMB/article/download/283/237. Acesso em: 29 out. 2024.

DALRI, A. B., et al. Fertirrigação com vinhaça concentrada no desenvolvimento da alface. *Revista Agrogeoambiental*, v. 6, n. 2, ago. 2014.

ELIA NETO, André. *Uso e reuso de água na indústria canavieira*. Worksop on the impact os new technologies on the sustentability of the sugarcane/Bioethanol prodution cycle. Campinas, Brasil, 2009.

GIL, Antonio Carlos. *Como Elaborar Projetos de Pesquisa*. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

LIRA, Selma F.; SILVA, Alex A. F.; RIBEIRO, Daniel L. Tratamento de vinhaça: alternativas e tecnologias**.** *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 7, n. 3, p. 324-336, 2013.

MINAYO, Maria C. de Sousa. *Pesquisa Social:* Teoria, Método e Criatividade. 30. ed. São Paulo: Hucitec, 2014.

OLIVEIRA, Ana S.; MENDES, Alexandre A.; RODRIGUES, Rafael F. Uso de vinhaça como fertilizante na cultura da cana-de-açúcar. *Agricultural Science Review*, v. 2, 2020.

PAULA, Rafael Carlos; BASSETTI, Fabiano José. Alternativas sustentáveis ao uso da vinhaça: uma revisão. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 13, n. 2, 2022.

SEIXAS, Anderson M.; BARROS, Ana C.; SILVA, Mário A. Avaliação do potencial poluidor da vinhaça. *Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada*, v. 2, n. 1, p. 27-34, 2016.

SILVA, F. C. da; FREIRE, F. J. (ed.). *Inovação e desenvolvimento em cana-de-açúcar: manejo, nutrição, bioinsumos, recomendação de corretivos e fertilizantes*. Brasília, DF: Embrapa; Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2024.

SILVA, Lucas R. Impactos ambientais da vinhaça: uma revisão. *Revista de Meio Ambiente e Sustentabilidade*, v. 2, 2014.

SILVA, T. A. *et al.* Estudo da viabilidade de implantação de um concentrador de vinhaça em uma usina produtora de etanol. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 35., Fortaleza, 2015. Anais... Fortaleza: ENEGEP, 2015. p. 1-15.

1 OLIVEIRA, Nélio de. Possui graduação em Tecnologia em Biocombustíveis pela FATEC Faculdade de Tecnologia de Piracicaba Dep. "Roque Trevisan" – Centro Estadual de Educação Tecnológica "Paula Souza" – CEETEPS.

2 RAMOS, Kelly da Silva. Possui graduação em Tecnologia em Biocombustíveis pela FATEC Faculdade de Tecnologia de Piracicaba Dep. "Roque Trevisan" – Centro Estadual de Educação Tecnológica "Paula Souza" – CEETEPS.

3 SILVA, Fabio César da. Possui graduação em Engenharia Agronômica pela Universidade de São Paulo (1987), graduação em Engenharia Florestal pela Universidade de São Paulo (1987), mestrado em Solos e Nutrição de Plantas pela Universidade de São Paulo (1991) e doutorado em Solos e Nutrição de Plantas pela Universidade de São Paulo (1995). Atualmente é professor pleno 1 (equivalente: adjunto) da FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PIRACICABA, ESTADO DE SÃO PAULO e pesquisador doutor da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Tem experiência na área de Agronomia, com ênfase em Nutrição Mineral na Agricultura, atuando principalmente nos seguintes temas: metais pesados, cana-de-açúcar, agroindústria sucroalcooleira e modelagem matemática.

Soro de leite: aplicação das proteínas como filmes comestíveis

MARQUES, Tadeu Alcides
RAMALHO, Pedro Henrique Paes
REZENDE NETO, Dionísio
MEDINA, Marcia Nalesso Costa Jordão

Resumo

O presente trabalho contextualiza o panorama da indústria brasileira de laticínios, destacando os impactos ambientais associados ao descarte do soro de leite e suas ricas propriedades nutricionais. O objetivo desta revisão bibliográfica é avaliar o potencial das proteínas presentes no soro de leite para a elaboração de filmes e recobrimentos comestíveis aplicados à conservação de alimentos. A pesquisa foi conduzida em bases científicas, como PubMed, Scielo e Google Acadêmico, bem como nos repositórios da Unicamp e USP, considerando artigos publicados entre 2006 e 2024. Esta abordagem visou mapear as aplicações das proteínas do soro em filmes comestíveis, detalhando as propriedades físico-químicas das proteínas, como a β-lactoglobulina e a α- lactalbumina, que são essenciais para a formação de filmes devido à sua flexibilidade, transparência e capacidade de formar barreiras contra oxigênio. A revisão bibliográfica mostrou que filmes comestíveis à base de soro de leite apresentam alta eficiência na conservação de frutas e vegetais, promovendo a preservação da umidade e a proteção microbiológica dos alimentos. Além disso, representam uma alternativa sustentável às embalagens sintéticas, contribuindo para a redução de resíduos plásticos e agregando valor a um subproduto que, muitas vezes, é descartado de forma inadequada. De acordo com os estudos pesquisados, os filmes comestíveis não substituem integralmente as embalagens tradicionais, mas desempenham um papel complementar, melhorando a sustentabilidade da cadeia produtiva de alimentos. O desenvolvimento e a aplicação de tecnologias que utilizam o soro de leite como matéria-prima são indispensáveis para atender às demandas por soluções mais sustentáveis e economicamente viáveis na indústria alimentícia, ao mesmo tempo em que promovem o reaproveitamento de recursos e a preservação ambiental.

Palavras – chave: recobrimento, composição, reaproveitamento, conservação, embalagens.

Abstract

The present study contextualizes the panorama of the Brazilian dairy industry, highlighting the environmental impacts associated with whey disposal and its rich nutritional properties. The objective of this bibliographic review is to evaluate the potential of whey proteins for the development of edible films and coatings applied to food preservation. The research was conducted using scientific databases such as PubMed, Scielo, and Google Scholar, as well as repositories from Unicamp and USP, considering articles published between 2006 and 2024. This approach aimed to map the applications of whey proteins in edible films, detailing the physicochemical properties of proteins like β-lactoglobulin and α-lactalbumin, which are essential for film formation due to their flexibility, transparency, and ability to create oxygen barriers. The bibliographic review showed that whey-based edible films exhibit high efficiency in preserving fruits and vegetables, promoting moisture retention and microbiological protection of foods. Furthermore, they represent a sustainable alternative to synthetic packaging, contributing to the reduction of plastic waste and adding value to a byproduct often improperly discarded. According

to the studies analyzed, edible films do not entirely replace traditional packaging but play a complementary role, enhancing the sustainability of the food production chain. The development and application of technologies that use whey as a raw material are indispensable for meeting the demands for more sustainable and economically viable solutions in the food industry while promoting resource reuse and environmental preservation.

Keywords: coating, composition, reuse, conservation, packaging

Resumen

El presente trabajo contextualiza el panorama de la industria láctea brasileña, destacando los impactos ambientales asociados a la eliminación del suero y sus ricas propiedades nutricionales. El objetivo de esta revisión bibliográfica es evaluar el potencial de las proteínas de suero para la elaboración de películas y recubrimientos comestibles aplicados a la conservación de alimentos. La investigación se realizó en bases de datos científicas, como PubMed, Scielo y Google Scholar, así como en los repositorios de la Unicamp y la USP, considerando artículos publicados entre 2006 y 2024. Este enfoque tuvo como objetivo mapear las aplicaciones de las proteínas de suero en películas comestibles, detallando las propiedades fisicoquímicas de las proteínas, como la β-lactoglobulina y la α-lactoalbúmina, que son esenciales para la formación de películas debido a su flexibilidad, transparencia y capacidad para formar barreras contra el oxígeno. La revisión de la literatura mostró que las películas comestibles a base de suero tienen una alta eficiencia en la conservación de frutas y verduras, promoviendo la conservación de la humedad y la protección microbiológica de los alimentos. Además, representan una alternativa sostenible a los envases sintéticos, contribuyendo a la reducción de los residuos plásticos y añadiendo valor a un subproducto que a menudo se desecha de forma inadecuada. Según los estudios investigados, los films comestibles no sustituyen totalmente a los envases tradicionales, sino que desempeñan un papel complementario, mejorando la sostenibilidad de la cadena de producción alimentaria. El desarrollo y la aplicación de tecnologías que utilicen el suero como materia prima son esenciales para satisfacer las demandas de soluciones más sostenibles y económicamente viables en la industria alimentaria, al tiempo que promueven la reutilización de recursos y la preservación del medio ambiente.

Palabras clave: recubrimiento, composición, reutilización, conservación, embalaje

INTRODUÇÃO

Devido a sua versatilidade e histórico, o leite tem sido empregado como matéria-prima na produção de uma variedade de produtos alimentícios amplamente consumidos dentre os quais se destacam a produção diferente tipos queijos e caseína (Almeida, 2013).

Na visão de Farias (2015), o processo de fabricação industrial ou artesanal de derivados de leite como por exemplo, o queijo surge um subproduto intrigante: o soro de leite. Frequentemente visto como um resíduo, o soro é uma oportunidade de alto valor para a indústria e a biotecnologia.

O soro de queijo é o líquido remanescente após a precipitação e remoção da caseína do leite durante a fabricação do queijo. Este subproduto representa 85–90% do volume e retém 55% dos nutrientes do leite (Leite, Barrozo e Ribeiro, 2012). Para Santin (2020), a parte residual liquida do processo de obtenção de derivados de leite, como por exemplo o queijo tem presença de várias moléculas tais como: proteínas, lactose, minerais (como cálcio, fosforo, magnésio e o zinco), vitaminas e alguns traços de gordura do leite. A disposição dos nutrientes do soro de leite varia de acordo com a fonte e o processo de beneficiamento.

Conforme Almeida e Silva (2023), Carvalho *et al.*, (2013) e Bald (2014), o soro de leite, é rico em matéria orgânica como por exemplo lactose e proteínas, o que causa danos ambientais se descartados sem tratamento prévio. No entanto, estudos demonstram o potencial de reaproveitamento do soro. O soro doce é o que possui maior aplicabilidade industrial; pode ser aproveitado, ainda na forma líquida direta ou com a realização da condensação para a produção de queijos frescos (ricota ou cottage) ou bebidas lácteas (Nunes *et al.*, 2018).

De acordo com Peixoto *et al.* (2023), Tosta *et al.* (2008) e Santos *et al.* (2015), outra forma de aproveitamento do soro é na elaboração de embalagens de alimentos como os filmes ou revestimentos comestíveis. Os filmes comestíveis representam uma alternativa promissora para a indústria alimentícia. As propriedades físico-químicas em especial das proteínas do soro de leite, por exemplo a gelificação, o que torna adequadas para essa aplicação.

Diante de um cenário de demanda por alimentos mais seguros e sustentáveis, o emprego de filmes comestíveis do soro de leite se destaca como uma solução eficiente.

O presente trabalho se propôs a efetuar um levantamento de dados sobre a aplicação das proteínas do soro de leite na proteção e conservação de alimentos, tendo em mente a qualidade e segurança alimentar, aliando-se à sustentabilidade e à valorização de subprodutos da indústria de laticínios.

METODOLOGIA

A busca por literatura foi realizada em bases de dados científicas, como *PubMed, Scielo, e Google* Acadêmico, Repositório Unicamp, USP utilizando palavras-chave como "soro de leite", "filmes comestíveis", "revestimentos comestíveis", "alimentos vegetais", "preservação de alimentos" e através da análise de estudos publicados nos últimos 18 anos (2006-2024), explorar as aplicações inovadoras do soro de leite em filmes e revestimentos comestíveis para alimentos vegetais.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Cadeia Produtiva do Leite

A cadeia produtiva do leite e derivados é um setor de grande importância econômica e social para o Brasil, recebendo dedicação especial do Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA). O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de leite, com mais de 34 bilhões de litros por ano, com produção em 98% dos municípios brasileiros, tendo a predominância de pequenas e médias propriedades, empregando perto de 4 milhões de pessoas (Brasil, [s.d]).

A atividade leiteira adquiriu uma posição incontestavelmente expressiva no agronegócio brasileiro, tanto na geração de empregos como no desempenho econômico (Sousa, 2015). De acordo com Rocha, Carvalho e Resende (2020), atualmente, a cadeia produtiva do leite é umas das principais atividades econômicas do país tendo um forte efeito na geração de emprego e renda no país. No entanto segundo o estudo conduzindo pelo Instituto de Economia Agrícola- (IEA, 2023), o panorama da produção de leite vem se variando desde 2021, com diversos produtores saindo da atividade ou tendo uma redução do rebanho em vários estados do país. Por sua vez o poder de compra do leite teve sua pior relação no primeiro bimestre, quando era necessária maior quantidade de leite para aquisição dos insumos (Lana *et al.*,2023). O ano de 2022 se destacou por altos preços que se intensificaram com a entrada da entressafra, o que comprometeu o consumo do produto pela população, devido a questões econômicas do país que se configuraram por um cenário de desemprego e queda de salários dos trabalhadores (Instituto de Economia Agrícola-IEA, 2023).

Conforme o Instituto de Economia Agrícola (IEA, 2023) e Carvalho (2023), a crescente nos preços do leite no ano de 2022 se deu por uma combinação de fatores internos e externos. A redução da produção nacional, aumento dos custos de produção (motivado pela alta de preços de milho e soja, piorado pela seca intensa causada pelo fenômeno La Niña), a escalada do abandono

da atividade leiteira e da consequente queda na captação de leite pela indústria, foram os principais fatores internos. Associadamente, o cenário internacional, marcado pelo conflito entre Rússia e Ucrânia, contribuiu para o aumento dos custos de produção no Brasil. Para Carvalho (2023), a tendência de queda de produção não é um fator isolado no Brasil, sendo observada em outros produtores tradicionais como a Nova Zelândia, que teve sua produção estagnada, e a união Europeia, que demonstrou redução na produção nos últimos anos. Apenas os Estados Unidos mostraram um leve crescimento, no entanto abaixo das taxas anteriores.

Em relação à disponibilidade de leite, 2024 deveria ter começado com o mercado em situação exatamente oposta ao que foi observado no primeiro semestre de 2023; no qual a produção brasileira de leite começou em queda (-1,2%) no primeiro trimestre em relação mesmo período de 2022 (Galan, 2024).

De acordo com Bellini (2024) e Carvalho, Bellozi e Arantes (2024), A tendência de eliminação de produtores menos eficientes e pequenos lacticínios, observada nos últimos anos, deve persistir. Esse cenário é agravado pela complexa conjuntura global e pela retração das importações chinesas, que, por sua vez, mantêm os preços internacionais estáveis, porém abaixo da média histórica. O fluxo das importações de derivados de leite pela China, o maior comprador mundial, está em um processo de reestruturação. O ambiente econômico chinês, com estimativa de menor crescimento vem gerando desaceleração do consumo interno. Por outro lado, o aumento da produção de leite na China está sucedendo parte das importações de lácteos. As recentes transformações que está ocorrendo no setor lácteo chinês têm gerado impactos significativos no comércio mundial de leite pois, a China é um dos maiores produtores e importadores de derivados de leite do mundo, consequentemente exerce uma influência determinante sob os preços dos insumos e a oferta global, impactando diretamente o mercado internacional.

Segundo Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (Cepea, 2024), no início de agosto, o mercado de leite demostrava uma tendência de queda nos preços para o terceiro trimestre, motivada pela perspectiva de aumento da produção e pela demanda sensível aos preços nas gôndolas.

No entanto, a produção esperada não acompanhou as projeções, devido a diversos fatores. O fator climático extremo em algumas regiões foi o principal responsável (as fortes chuvas no Sul prejudicaram a produção, enquanto a seca e o calor no Sudeste e centro-oeste afetaram a qualidade das pastagens). Consequentemente, reduzindo a disponibilidade de forragem e aumentando os custos de produção.

Desse modo, a cadeia agroindustrial do leite brasileira necessita de políticas governamentais que integrem os macros segmentos de produção de matéria-prima, industrialização e comercialização para fortalecer o setor e o tornar mais competitivo frente ao mercado externo (Nascimento *et al.*, 2024).

3.2 Derivados de Leite

O leite é um dos produtos de origem animal mais consumidos no mundo e possui grande importância socioeconômica no cenário agrícola nacional e, em especial, para um expressivo número de agricultores familiares, em virtude de serem responsáveis por 60% da produção de leite no Brasil (Silva *et al.*, 2019).

Segundo Bernardino (2021) o consumo de leite e seus derivados é fundamental para a saúde de muitos brasileiros. A indústria láctea é extensa, dada a vasta quantidade de gado leiteiro em nosso país. Produtos lácteos são comuns na dieta diária da população, incluindo queijos, iogurtes e leites fermentados, assim como leite e manteiga. Conforme Siqueira (2019), dentre todos os produtos derivados de leite os mais consumidos são os lácteos frescos (inclui leite fluido e iogurte), manteiga, queijos e leite em pó. O beneficiamento do leite mediante ao processamento tecnológico e adição de ingredientes para a produção de derivados lácteos incide diretamente na valorização financeira do produto (Nascimento *et al.*, 2024).

De acordo com Perry (2004), o primeiro derivado lácteo a ser produzido e consumido pelo homem, foi o queijo. Suas origens são datadas de pelo menos 7.000 anos A.C e evidencias arqueológicos revelam a existência de produção e consumo de queijos feitos a partir de leite de vaca e de cabra.

Desse modo, a produção de queijo se difundiu pelo mundo, consequentemente dando origem em uma imensa variedade de queijos, com mais de mil tipos catalogados.

No Brasil, os queijos também são muito apreciados, eles perdem apenas para o leite fluido, representando quase 10% dos lácteos consumidos no País. Dentre os queijos mais citados pelos brasileiros na pesquisa do IBGE estão, nesta ordem: queijo mozzarella, queijo minas, requeijão e queijo prato (Siqueira e Schettino, 2021).

De acordo com a associação brasileiras das indústrias de queijo (ABIQ, 2021), o queijo representa uma excelente fonte de aminoácidos essenciais, minerais essenciais como cálcio, Fósforo, Selênio, Zinco e Sódio e vitaminas A, B2, B12, D e K2, gorduras benéficas e baixa ou sem lactose (dependo do tipo de queijo). Além dos benefícios nutricionais apresentados, o queijo tem uma matriz com características físico-químicas favoráveis para o crescimento e metabolismo das

cepas probióticas. Estudos recentes investigaram os impactos positivos que queijos probióticos poderiam apresentar para a saúde humana (Carmo, Gomes e Cruz, 2024).

Juntamente com a industrialização do leite para a produção de derivados lácteos, há a geração de coprodutos, destacando-se o soro de queijo (Nunes e Santos, 2015). O soro de leite representa de 80 a 90% do volume total do leite utilizado durante a produção de queijos e contém, aproximadamente, 55% dos nutrientes do leite: proteínas solúveis, lactose, vitaminas, minerais e uma quantidade mínima de gordura (Alves *et al.*, 2014). Sob o ponto de vista industrial, há dois tipos principais de soro de leite: soro de leite doce e soro de leite ácido classificados por sua acidez total ou por seu conteúdo em ácido láctico (Oliveira, Bravo e Tonial, 2012).

O soro do leite é obtido através do processamento do queijo, no qual a caseína é insolubilizada no seu ponto isoelétrico pela ação da renina, sendo o líquido remanescente chamado de soro doce. Pode também ser obtido por precipitação ácida, sendo chamado de soro ácido (Pelegrine e Carrasqueira, 2008).

O processo de coagulação do leite pode ocorrer, principalmente, por duas vias: coagulação ácida ou enzimática, sendo a característica do gel obtido dependente do tipo de coagulação, do tipo de processamento aplicado e da composição do leite inicial (Silva *et al.*, 2022).

A coagulação enzimática do leite envolve modificação da micela de caseína pela proteólise limitada (quebra da ligação peptídica Phe_{105} – Met_{106}) provocada pelas enzimas do coalho ou de coagulantes, seguida pela agregação, induzida pelo cálcio, dessas micelas alteradas (Paula, Carvalho e Furtado, 2009).

Já a coagulação ácida do leite ocorre pela adição de culturas *starter*, que fermentam a lactose e produzem ácido lático (Mostaro, 2022). A acidificação é proporcionada pela fermentação da lactose para ácido lático pelas bactérias láticas adicionadas ao leite ou pela acidificação direta com adição de ácido lático em alguns casos (Paula, Carvalho e Furtado, 2009).

Na visão Tsakali *et al.* (2010) e Paula (2005), os produtos que têm a característica de gerar o soro ácido são ricota, cottage, cream cheese, Petit Suisse e Quark e o soro doce é obtido partir de queijo minas frescal, Cheddar e Emmental, suíço, mussarela e prato.

3.3 Soro de Leite e os Impactos Ambientais

O soro é a porção aquosa liberada do coágulo durante a fabricação convencional de queijos, considerado um efluente residual que pode acarretar graves problemas ambientais associados ao seu alto teor de matéria orgânica (Oliveira, Bravo e Tonial, 2012). Historicamente, o soro de leite

era considerado um desperdício e um incômodo aos para os produtores de queijo e de caseína, o que ocasionou descarte de grandes volumes em corpos de água próximos.

De acordo com Buchanan *et al.* (2023) e Carminatti (2020), devido à alta presença de carga orgânica encontrada no soro de leite (DBO 30-50g/l e DQO 60-80g/l), seu descarte inadequado pode causar graves problemas ambientais.

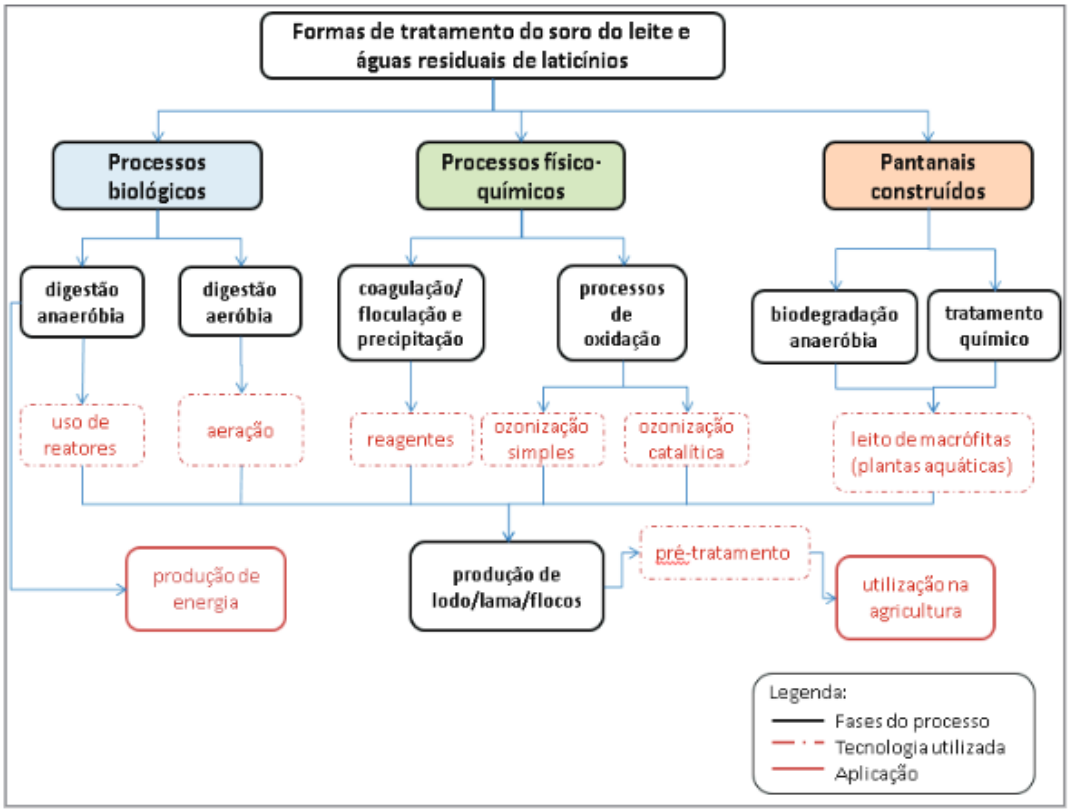
Conforme Alves *et al.* (2014) e Barreto *et al.* (2013), descrevem que o soro de leite como um dos efluentes mais desafiadores para tratamento por conta à sua alta perecibilidade. Eles apontam que, ao ser despejado em corpos de água, o soro eleva a turbidez e reduz os níveis de oxigênio dissolvido, prejudicando organismos aeróbicos e causado desequilíbrios ecológicos. O descarte prolongado de soro em corpos de água favorece a acumulação de nitrogênio e fósforo, agravando o processo de eutrofização. Esse processo estimula o crescimento excessivo de plantas aquáticas e levando à morte de peixes e outras espécies.

Para Carminatti (2020), sendo que, esses problemas ocorrem em razão dos pequenos laticínios que descartam o soro do leite de maneira inadequada, lançando diretamente no solo, rios e redes de coleta de esgoto sem o devido tratamento. Isso ocorre pelo fato de que o emprego de média a alta tecnologia para tratamento do soro não ser economicamente e estruturalmente viável, sendo que necessitam de uma quantidade mínima de soro para seu funcionamento.

Questões ambientais associadas à produção de soro do leite pelas agroindústrias de laticínios, impulsionam buscas por alternativas que visem tanto a preservação do meio ambiente, quanto a agregação de valor a esse coproduto (Nunes *et al.*, 2018).

Na visão de Carvalho, Prazeres e Rivas (2013), descrevem as principais formas de tratamento de efluentes de laticínios e de soro de leite: processos biológicos (aeróbicos ou anaeróbicos), tratamento físico-químico (precipitação, coagulação/floculação, oxidação) e Sistemas Alagados Construídos (tratamento químico e biodegradação anaeróbia). Como observado na Figura 1, que ilustra as principais formas de tratamento de efluentes de laticínios e soro de leite, incluindo processos biológicos, físico-químicos e sistemas alagados construídos.

Figura 1: Formas de tratamentos de efluentes de laticínios de leite



Fonte: Nunes *et al.* (2018).

O soro de leite por ser um grande poluidor ambiental, se torna um enorme problema, pelo fato de existirem muitas indústrias e este mercado ser continuamente crescente, com poucas soluções simples (Carminatti, 2020). No entanto o soro de leite se apresenta uma boa fonte de proteínas de alto valor biológico para o consumo humano. As proteínas do soro do leite são muito conhecidas pela versatilidade de suas propriedades funcionais tecnológicas como ingredientes em produtos alimentícios (Capitani *et al.,* 2005).

3.4 Composição e Reaproveitamento

A composição do soro de leite fresco liberada do coágulo durante a fabricação de queijo possui cerca de 94,25% de água, 0,8% de proteínas do soro, 4,30% de lactose, 0,55% de minerais e 0,10% de gordura (Almeida *et al.*, 2013). O soro de leite (doce e ácido) apresenta aproximadamente 6,42% de sólidos totais. Os sólidos totais do soro de leite são compostos por 0,87% de proteína; 0,50% de gordura; 4,5% de lactose; 0,50% de cinzas; e 0,05% de ácido lático (Carvalho, 2012).

Dentre todos estes componentes, a lactose e proteínas são os mais importantes para a indústria de alimentos. A lactose é um tipo de carboidrato de baixo poder adoçante, muito usada na indústria alimentícia e como material energético para vários processos biotecnológicos, principalmente na indústria farmacêutica (Nunes e Santos, 2015).

As proteínas do soro do leite apresentam uma estrutura globular contendo algumas pontes de dissulfeto, que conferem um certo grau de estabilidade estrutural (Haraguchi, Abreu e Paula, 2006). As principais proteínas do soro são a β-lactoglobulina e a α-lactalbumina. Tais proteínas são pequenas, globulares e representam, aproximadamente, 70 a 80% do total das proteínas presentes no soro (Pinto, 2010). Conforme Smithers *et al.* (1996) e Haraguchi, Abreu e Paula (2006), 20 a 30% são compostos proteicos menores que incluem o glicomacropeptídeo, albumina sérica bovina, lactofererrina, imunoglobulinas, fosfolipoproteínas, beta-microglobulinas, gama-globulinas, lacto-peroxidase, lisozima, lactolina, relaxina, lactofano, fatores de crescimento IGF-1 e IGF-2, proteoses-peptonas e aminoácidos livres. Como observado na Tabela (adaptado de Pinto, 2010), que apresenta as concentrações de aminoácidos essenciais nas proteínas de soro, como isoleucina, leucina, lisina e outros, expressas em mg/g de proteína.

Tabela 1: Conteúdo de aminoácidos essenciais de algumas proteínas (mg/g de proteína)

Aminoácido	Proteínas de Soro
Isoleucina	76
Leucina	118
Lisina	113
Metionina+Cisteína	52
Fenilalanina+tirosina	70
Treonina	84
Triptofano	24
Valina	72

Fonte: adaptado de Pinto, 2010.

Segundo Papiz *et al.* (1986), McIntosh *et al.* (1995), Wit (1998) e Haraguchi, Abreu e Paula (2006), a β-lactoglobulina (β-LG) é a maior proteína do soro de leite (45% - 57%), tem uma representatividade de cerca 3,2g/L. O arranjo globular da β-LG é estável contra ácidos e enzimas proteolíticas presentes no estômago, essa estabilidade é importante em prol da função biológica como uma carregadora de retinol (provitamina A) da vaca para o bezerro jovem. A β-LG é uma

rica fonte de em cisteína, um aminoácido essencial que tem característica de estimular a síntese de glutationa um tripeptídeo anticarcinogênico gerado pelo fígado para proteção contra tumores intestinais.

A α-lactalbumina (α-LA), uma importante proteína do leite materno humano e do soro de leite de vaca, pode contribuir para um padrão equilibrado de aminoácidos e aumentar a absorção de cálcio e zinco (Kelleher *et al.*, 2003). A α-lactolbumina é única proteína que contêm o maior teor de triptofano (6%) dentre as fontes protéicas alimentares (Heine *et al.,* 1996). A α-LA é precursora da biossíntese de lactose no tecido mamário e possui a capacidade de se ligar a certos minerais, como cálcio e zinco, o que pode afetar positivamente sua absorção (Haraguchi, Abreu e Paula, 2006). Conforme Lönnerdal (2003), a α-lactalbumina desempenha atividade antimicrobiana contra bactérias e vírus patogênicos e também atividade prebiótica, com estímulo de crescimento de bactérias benéficas como Lactobacilos e Bifidobactérias.

O alto valor nutricional das proteínas do soro pode ser comprovado pelos aminoácidos que as compõem. As proteínas do soro possuem, proporcionalmente, mais aminoácidos contendo enxofre (cisteína e metionina) do que a caseína, que é a proteína láctea que fica retida na massa do queijo (Pinto, 2010). Conforme Alegre (1988), Ozer e Evrendilek (2022) e Ramos *et al.* (2021), por conta do alto valor nutricional das proteínas do soro de leite apresenta alto potencial de utilização como insumo tanto para a indústria alimentícia (bebida fermentada e não fermentada, alimento semissólidos suplementos alimentares e revestimentos) quanto para a de bioprocessamento, fabricação de etanol e biogás, entre outros produtos de valor agregado. Uma série de estudos foram feitas para o desenvolvimento da utilização do soro como componentes de alimentos para humanos (Mizubuti, 1994).

Caracterizado pela riqueza proteica presente em sua composição e pelo grande impacto ambiental que seu descarte gera, diversos pesquisadores têm buscado, ao longo dos últimos anos, alternativas viáveis para a reutilização deste subproduto (Pinheiro *et al.*, 2024). Em muitos países, o soro de leite gerado pelas indústrias de queijo é empregado na alimentação animal ou como fonte de enriquecimento de nutrientes em produtos de maior valor agregado, além de ser utilizado no desenvolvimento de novos produtos alimentícios (Diniz *et al.,* 2024).

As proteínas presentes no soro do leite podem ser aplicadas como matéria-prima multifuncional. Dentre as propriedades pode-se citar: aeração, emulsificação, gelatinização e alta solubilidade. Estas propriedades permitem a elaboração de alimentos com aparência, sabor e textura agradáveis ao paladar (Maia *et al.*, 2020). Tais propriedades funcionais se dão devido à

presença e ação da β-lactoglobulina, α-lactoalbumina, imunoglobulinas, albumina do soro e lactoferrina (Pinheiro et al., 2024). A identificação de alternativas para um adequado aproveitamento do soro de leite é de fundamental importância em função de sua qualidade nutricional, do seu volume e de seu poder poluente (Giroto e Pawlowsky, 2001). A grande aplicação destas proteínas em alimentos é relatada não por proporcionar apenas uma propriedade física particular aos alimentos, mas também pela reprodutibilidade dessas propriedades e capacidade de proporcionar mais que uma finalidade funcional na aplicação como ingrediente alimentício (Alves *et al.*, 2014).

Segundo Almeida e Silva (2023), descreve que o reaproveitamento do soro de leite pode ocorrer na formulação de Ricota, Bebida láctea, Produtos cárneos, soro em pó, extração da lactose, alimentação animal, produção de vinagre e etanol, aromas, suplemento alimentar, cosméticos e medicamentos.

Outra forma de aproveitamento dessas proteínas é na elaboração de embalagens de alimentos como os filmes e revestimentos comestíveis. Esses apresentam vantagens como: extensão da validade comercial e melhoria na qualidade nutricional dos alimentos, além disso, atuam na redução às embalagens sintéticas (Santos *et al.,* 2015).

3.5 Filmes Comestíveis

De acordo com Assis e Leoni (2003) e Santos *et al.*, (2015), a utilização de filmes ou revestimentos comestíveis em frutas e vegetais para prolongar sua vida útil, resulta do interesse em desenvolver embalagens biodegradáveis e comestíveis, atendendo à demanda dos consumidores por alimentos de alta qualidade e da crescente preocupação ambiental em relação ao descarte de materiais de embalagem não renováveis. Os filmes são películas finas previamente formadas e só então aplicadas no produto, como envoltório ou entre as camadas dele. Enquanto, os revestimentos são filmes formados no produto, cuja base é aplicada diretamente sobre a superfície do mesmo, onde ocorre a secagem e, assim, a formação do filme, com a função de proteger o alimento, permanecendo durante o uso e até durante o consumo (Santos *et al.,* 2015).

Conforme Barboza *et al.* (2022), esses revestimentos têm como função proteger o produto contra danos físicos e microbiológicos, evitar a perda de compostos voláteis que conferem sabor e aroma, retardar o processo de envelhecimento natural e manter uma aparência mais fresca e atrativa. Em sua formulação, os compostos usados geralmente são derivados de materiais alimentícios e classificados como seguros, de acordo com o conceito GRAS ("Generally

Recognized as Safe") do FDA (Food and Drug Administration), sendo processados conforme as Boas Práticas de Fabricação (BPF) para alimentos.

Para Villadiego *et al.* (2004), a presença de longas cadeias poliméricas é essencial, pois proporciona ao revestimento certa insolubilidade e estabilidade quando em contato com água, garantindo que o produto mantenha suas propriedades protetoras e de preservação no ambiente de armazenamento. Por sua vez Villadiego *et al.* (2004), Barboza *et al.* (2022) e Santos *et al.* (2015), dentre os materiais utilizados para obtenção filmes ou recobrimentos comestíveis são em quartos grupos: proteínas (proteína do soro de leite, colágeno, gelatina, zeína), Lipídeos (óleos, gorduras e ceras), polissacarídeos (amidos, éteres de celulose, dextrina, pectina e quitosana) e compostos (são associações de proteínas mais lipídeos ou polissacarídeos mais lipídeos).

3.6 Filmes Comestíveis de Proteínas

As proteínas são populares devido à sua abundância e suas qualidades nutricionais. A proteína para elaboração de filmes pode ser extraída de cereais (glúten, prolaminas), leite (caseína, soro de leite), músculo (miofibrilar) e tecido conjuntivo (gelatina) de espécies marinhas ou terrestres. No estudo de Santos et al. (2015) e Feng *et al.* (2018), compreende que as proteínas do soro de leite são insumos de grande importância na confecção de filmes e recobrimentos comestíveis, devido sua peculiaridade de formar filmes flexíveis, transparência, são neutras em sabor e odor, apresentam boa capacidade de barreira ao oxigênio contribuindo para sua aceitabilidade durante o consumo.

No Quadro 1, estão sintetizadas as principais formulações de filmes comestíveis à base de proteína de soro de leite aplicadas em diferentes alimentos.

Quadro 1: as principais formulações de filmes comestíveis à base de proteína de soro de leite aplicadas em diferentes alimentos

ALIMENTO	FORMULAÇÃO	RESULTADOS	AUTOR
Fatias de Bananas	0,65 g de concentrado protéico, foi adicionada à 10 mL de água destilada, à temperatura ambiente. Em seguida, a suspensão foi solubilizada após 30 min por 90°C. À solução foram adicionados 0,3 mL de glicerol sob agitação até	O revestimento aplicado às fatias de banana demonstrou efetividade na redução da perda de água, evidenciada pelo menor encolhimento das frutas tratadas com o revestimento comestível.	Moritz *et al.*, 2009

	completa homogeneização.		
Goiabas	Utilizaram-se soluções de quitosana nas concentrações de 2%, 4%, 6% sem o plastificante glicerol e quitosana nas concentrações de 2, 4%, 6% com o plastificante glicerol na proporção de 1:1. concentrado proteico de soro de leite nas concentrações de 6% e 8%, com glicerol 1:1. E glúten nas concentrações proteicas de 10% e 12%, com glicerol 1:1	Todos os recobrimentos tiveram boa aderência às frutas, sem problema de descamação.	Cerqueira *et al.*, 2010
Laranja Pêra	Foram empregadas soluções filmogênicas, que continham 4, 6 ou 8% de proteína de concentrado protéico de soro de leite, associado a 3 e 6% de glicerol como plastificante e 4 e 8% de sorbitol como plastificante.	A redução na perda de matéria fresca e as alterações físico-químicas, proporcionadas pelas diferentes coberturas à base de proteínas, são de pequena magnitude	Alleoni, Jacomino e Rosa, 2006
Maça	Utilizou-se a proteína de soro de leite concentrada a 6,0% m/m e 2% m/m de glicerol, foi adicionado os agentes antiescurecimento: ácido cítrico (0,0%, 1,5% e 3,0%) e ácido ascórbico (0,0%, 1,0 e 2,0%).	Influência dos revestimentos ativos, adicionados de ácido cítrico e ácido ascórbico mantiveram a coloração das maçãs minimamente processadas, possibilitando assim o aumento na validade comercial deste produto.	Amaral, 2014

Fonte: Autores

Os alimentos foram mergulhados nas soluções preparadas com soro de leite e posteriormente tiveram o excesso escorrido (Moritz *et al.,* 2009, Cerqueira *et al.,* 2010, Alleoni, Jacomino e Rosa, 2006, Amaral, 2014).

As propriedades mecânicas dos filmes comestíveis à base de proteínas também são melhores do que as dos filmes à base de polissacarídeos e gorduras porque as proteínas têm uma

estrutura única (com base em 20 monômeros diferentes) que confere uma gama mais ampla de propriedades funcionais, especialmente um alto potencial de ligação intermolecular (Bourtoom, 2009).

Conforme Santos *et al.* (2015), Bourtoom (2009) e Galus *et al.* (2020), por conta de sua natureza hidrofílica, essas embalagens tornam-se seriamente permeáveis à água e menor resistência mecânica em relação aos polímeros sintéticos, o que reduz sua aplicação em produtos que exigem barreira contra umidade. Na formulação de filmes ou recobrimentos, alguns compostos, como plastificantes, agentes de reticulação, emulsificantes e reforços, são usados para aprimorar ou alterar as propriedades básica do material. Além disso, diferentes compostos ativos, como antimicrobianos, antioxidantes, corantes, aromatizantes e nutracêuticos são incorporados à solução formadora de filme para melhorar a qualidade, estabilidade (Galus *et al.,* 2020).

Plastificantes são materiais importantes no desenvolvimento de filmes comestíveis, pois aumentam a flexibilidade e resiliência dos polímeros (Barboza *et al.,* 2022). Plastificante é uma substância não-volátil que, quando adicionada a um material altera suas propriedades mecânicas e/ou físicas (Alleoni, Jacomino e Rosa, 2006). De acordo com Alleoni, Jacomino e Rosa (2006) e McHung e Krochta (1994), os filmes formados por meio da desnaturação térmica das proteínas do soro têm a característica de serem quebradiços, exigindo o uso de plastificantes para aumentar a flexibilidade do filme. O sorbitol e glicerol agem como plastificantes pois, tem a capacidade de reduzir as pontes de hidrogênio (ligação de Van der Waals), enquanto aumentam os espaços intermoleculares e diminuir as interações entre as cadeias poliméricas, aumentando a flexibilidade e diminuindo as propriedades de barreiras dos filmes.

No estudo de Tosta *et al.* (2008), avaliaram a eficiência de filmes à base de concentrado de soro de leite bovino e glicerol como recoberto para preservar a qualidade de morangos armazenados à temperatura ambiente.

Observou-se que os morangos revestidos apresentaram uma menor redução de massa inicial em relação aos morangos do grupo controle. Outro aspecto observado foi a presença de contaminação microbiana. Os morangos revestidos mantiveram sua superfície praticamente inalterada enquanto os morangos sem revestimento apresentaram sinais de contaminação por fungos.

Por sua vez Sabino *et al.* (2008), observou-se que concentração de glicerol, utilizado como plastificante, exerceu influência na resistência dos filmes. A formulação com 3% de glicerol desmontou maior tensão (12.000N/cm2), indicando maior resistência mecânica. Contudo, para

concentrações superiores (7%), houve uma redução na tensão (5.000 N/cm2), sugerindo que o excesso de plastificante pode comprometer a estrutura do filme.

Nessa mesma perspectiva os autores Alleoni, Jacomino e Rosa (2006), avaliaram o efeito de coberturas à base de concentrado protéico de soro de leite (CPSL), associadas a dois tipos de plastificantes (glicerol e sorbitol), em laranja 'Pêra'. Observou-se que após 11 dias de armazenagem, as laranjas cobertas com solução filmogênica de 6% de proteína e 6% de glicerol, e laranjas cobertas com solução de 4% de proteína e 8% de sorbitol perderam menos massa, quando comparadas às outras combinações de proteína e plastificante.

Conforme descrito por Oliveira *et al.* (2008) e Tosta *et al.* (2009), os morangos revestidos mantiveram sua superfície praticamente inalterada devido à presença de glicomacropeptídeo, lactoferrina e lactoperoxidase, substâncias com atividade antimicrobiana. Nesse sentido Andrioli *et al.* (2009), utilizaram filmes protéicos à base de soro de leite acrescidos de lactoferrina para avaliar sua atividade antimicrobiana os resultados apresentaram que esses filmes mostraram atividade antimicrobiana, inibindo totalmente o crescimento de *Staphylococcus aureus*, *Proteus mirabilis* e *Escherichia coli*.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O reaproveitamento das proteínas do soro de leite para confecção de filmes comestíveis torna-se como uma alternativa promissora e sustentável para indústria alimentícia. A produção desses filmes, além de promover o aproveitamento e valorização de um subproduto da fabricação de queijos e derivados, contribui para a redução do impacto ambiental associado ao descarte inadequado do soro e de embalagens sintéticas.

As proteínas do soro de leite demonstram características favoráveis, como flexibilidade, transparência e capacidade de formar barreiras contra oxigênio, que são essenciais para uma embalagem comestível eficaz.

O emprego dos filmes comestíveis não visa substituir as embalagens sintéticas, mas sim atuar em sinergia com elas, promovendo uma melhor qualidade ao produto e proporcionando economia. Dessa forma, considera-se que novas pesquisas sejam fundamentais para aprofundar o entendimento das propriedades desses filmes, além de otimizar sua produção.

REFERÊNCIAS

ALEGRE, Ranulfo Monte. - *Contribuição ao estudo de aproveitamento de soro de queijo para produção de lactase e etanol.* 1988. 198 páginas. Tese (Doutorado em Programa de Pós-Graduação em Ciência de Alimentos). UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1988.

ALLEONI, Ana Cláudia Carraro; JACOMINO, Angelo Pedro; ROSA, Alexandra Soares. Recobrimento de laranja 'Pêra' com filme de concentrado protéico de soro de leite associado a plastificantes. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 41, p. 1221-1226, 2006.

ALMEIDA, Cristine et al. Proteína do soro do leite: composição e suas propriedades funcionais. *Enciclopédia biosfera*, v. 9, n. 16, 2013.

ALMEIDA, Raquel Pacheco de; SILVA, William Kássio da. - *Soro do leite, descarte e reaproveitamento.* 2023. 28 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Tecnólogo em Laticínios). IFAL - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas, Campus Satuba, 2023.

ALVES, Maura Pinheiro *et al.* Soro de leite: tecnologias para o processamento de coprodutos. *Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes*, v. 69, n. 3, p. 212-226, 2014.

ANDRIOLI, Karina Alves *et al.* Desenvolvimento de filmes bioativos à base de soro de leite acrescidos de lactoferrina. In: CONGRESSO NACIONAL DE EXTENSÃO UNIVERSITÁRIA, 3.; ENCONTRO DE ATIVIDADES CIENTÍFICAS DA UNOPAR, 12., 2009, Londrina. *Anais[...]*. Londrina: UNOPAR, 2009.

ASSIS, Odilio B. G.; LEONI, Ariane Maria. Filmes comestíveis de quitosana. *Revista Biotecnologia Ciência e Desenvolvimento*, v. 30, p. 33-38, 2003.

BALD, Júlio André *et al.* Características físico-químicas de soros de queijo e ricota produzidos no Vale do Taquari, Rio Grande Sul. *Revista Jovens Pesquisadores*, v. 4, n. 3, p. 90-99, 2014.

BARBOZA, Henriqueta Talita Guimarães *et al.* Filmes e revestimentos comestíveis: conceito, aplicação e uso na pós-colheita de frutas, legumes e vegetais. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 9, 2022.

BARRETO, Luciano *et al.* Eutrofização em rios brasileiros. *Enciclopédia biosfera*, v. 9, n. 16, 2013.

BELLINI, José Luiz. *Cadeia produtiva do leite vê cenário desafiador em 2024*. Embrapa, 2024. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/86780410/cadeia-produtiva-do-leite-ve-cenario-desafiador-em-2024. Acesso em: 10 maio. 2024.

BERNARDINO, K. *Derivados do leite*: conheça os principais produtos. [s.l.], 2021. Disponível em: https://blog.mfrural.com.br/derivados-do-leite/. Acesso em: 17 maio 2024.

BOURTOOM, TJIFRJ. Edible protein films: properties enhancement. *International Food Research Journal,* v. 16, n. 1, p. 1-9, 2009.

BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. Mapa do Leite. [s.l.], [s.d.]. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/producao animal/mapa-do

leite#:~:text=O%20Brasil%20%C3%A9%20o%20terceiro,de%204%20milh%C3%B5es%20de%20pessoas. Accesso em: 10 maio 2024.

BUCHANAN, Dominic *et al.* Recent advances in whey processing and valorisation: Technological and environmental perspectives. *International Journal of Dairy Technology*, v. 76, n. 2, p. 291-312, 2023.

CAPITANI, Caroline Dário *et al.* Recuperação de proteínas do soro de leite por meio de coacervação com polissacarídeo. *Pesquisa agropecuária brasileira*, v. 40, p. 1123-1128, 2005.

CARMINATTI, Thais. - *Efeito da aplicação de soro de leite nas características químicas e microbiológicas de solos*. 2020. 72 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária). UFSM - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020.

CARMO, Matheus Rodrigues S, GARCIA-Gomes Aline S, DA CRUZ, Adriano G. queijos probióticos: uma combinação promissora para a saúde? *Revista Técnica da Agroindústria*, vol. 1, n. 2, 2024.

CARVALHO, Fátima; PRAZERES, Ana R.; RIVAS, Javier. Cheese whey wastewater: Characterization and treatment. *Science of the total environment*, v. 445, p. 385-396, 2013.

CARVALHO, Glauco Rodrigues; BELLOZI, Ítalo de Paula.; ARANTES, Maria Souza Lima. *Leite na China*: mudanças na estrutura e produção e importações. 2024. p. 12-13. Embrapa.

CARVALHO, Kassandra Duarte. - *Utilização de soro de leite doce na fabricação de sorvete de massa*. 2012. 172 p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável e Qualidade de Vida). UNIFAE – Centro Universitário das Faculdades Associadas de Ensino, São João da Boa Vista, 2012.

CARVALHO, Marcelo Pereira de. Vai faltar leite no mundo mesmo? *Milkpoint*, 2023. Disponível em: https://www.milkpoint.com.br/colunas/marcelo-pereira-de-carvalho/vai-faltar-leite-no-mundo-mesmo-233862/. Acesso em: 04 março. 2024.

CEPEA – Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. *Leite/Cepea*: oferta não cresce como esperado e preços voltam a subir. [s.l.], 2024. Disponível em: https://www.cepea.esalq.usp.br/br/releases/leite-cepea-oferta-nao-cresce-como-esperado-e-precos-voltam-a-subir.aspx?pagina=1. Acesso em: 10 outubro. 2024.

DINIZ, Thalisson Gonçalves. Aproveitamento do soro de leite na indústria alimentícia. *MilkPoint*, 02 novembro. 2024. Disponível em: https://www.milkpoint.com.br/artigos/industria-de-laticinios/aproveitamento-do-soro-de-leite-na-industria-alimenticia-237401/. Acesso em: 10 novembro. 2024.

FARIAS, Patrícia de Oliveira Leite. *Potencialidade do soro de queijo frente a outras fontes de carbono para produção de β-galactosidase por Kluyveromyces lactis URM 6684*. 2015. 57 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos). UFRPE - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2015.

FENG, Zhibiao *et al.* Edible coating based on whey protein isolate nanofibrils for antioxidation and inhibition of product browning. *Food Hydrocolloids*, v. 79, p. 179-188, 2018.

GALAN, V. *O que esperar do mercado de leite em 2024?* Disponível em: https://www.milkpoint.com.br/noticias-e-mercado/panorama-mercado/o-que-esperar-do-mercado-de-leite-em-2024-235899/. Acesso em: 10 novembro. 2024.

GALUS, Sabina *et al.* Novel materials in the preparation of edible films and coatings- A review. *Coatings*, v. 10, n. 7, p. 674, 2020.

GIROTO, J. M.; PAWLOWSKY, U. O soro de leite e as alternativas para o seu beneficiamento. *Brasil Alimentos*, v. 2, n. 5, p. 43-46, 2001.

HARAGUCHI, Fabiano Kenji; ABREU, Wilson César de; PAULA, Heberth de. Proteínas do soro do leite: composição, propriedades nutricionais, aplicações no esporte e benefícios para a saúde humana. *Revista de nutrição*, v. 19, p. 479-488, 2006.

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRICOLA (IEA). Panorama do Mercado do Leite em 2023. V. 18, n. 8, agosto 2023. Disponível em: http://www.iea.agricultura.sp.gov.br/ftpiea/AIA/AIA-29-2023.pdf. Acesso em: 10 novembro. 2024.

LANA, Manuela Sampaio *et al. Poder de compra do leite em 2022*. Anuário Leite 2023: leite: baixo carbono. Embrapa Gado de Leite, 2023. p. 8-10. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1154264/anuario-leite-2023-leite-baixo-carbono. Acesso em: 12 março 2024.

LEITE, Marcelo Teixeira; BARROZO, Marcos Antonio de Souza; RIBEIRO, Eloizio Julio. Canonical analysis technique as an approach to determine optimal conditions for lactic acid production by lactobacillus helveticus ATCC 15009. *International Journal of Chemical Engineering*, v. 2012, 2012.

MAIA, Geisa Priscilla Araújo Gomes *et al.* Vantagens da aplicação do soro de leite na formulação de produtos alimentícios. *MilkPoint,* 3 novembro. 2024. Disponível em: https://www.milkpoint.com.br/artigos/industria-de-laticinios/vantagens-da-aplicacao-do-soro-de-leite-na-formulacao-de-produtos-alimenticios-219631/. Acesso em: 10 novembro. 2024.

MCHUGH, Tara Habig; KROCHTA, John M. Sorbitol-vs glycerol-plasticized whey protein edible films: integrated oxygen permeability and tensile property evaluation. *Journal of agricultural and food chemistry,* v. 42, n. 4, p. 841-845, 1994.

MCINTOSH, Graeme H. *et al.* Dairy proteins protect against dimethylhydrazine-induced intestinal cancers in rats. *The Journal of nutrition*, v. 125, n. 4, p. 809-816, 1995.

MIZUBUTI, Ivone Yurika. Soro de leite: composição, processamento e utilização na alimentação. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 15, n. 1, p. 80-94, 1994.

MOSTARO, Letícia. Coagulação do leite: do fluido ao gel. *MilkPoint*. 2022. Disponível em: https://www.milkpoint.com.br/artigos/cruzadinha/coagulacao-do-leite-do-fluido-ao-gel-232006/. Acesso em: 24 outubro. 2024.

NASCIMENTO, Maria da Penha Silva do *et al.* Prospecção da cadeia produtiva do leite no Brasil: panorama histórico, impactos e desafios. *Observatório de la Economia Latino-Americana*, v. 22, n. 4, 2024.

NUNES, Lauane; SANTOS, M. G. Caracterização físico-química de soros obtidos de diferentes tipos de queijos. *Horizonte Científico*, v. 9, n. 2, 2015.

NUNES, Luane Alcântara *et al.* O soro do leite, seus principais tratamentos e meios de valorização. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v. 11, n. 1, p. 301-326, 2018.

OLIVEIRA, Débora F. de; BRAVO, Claudia EC; TONIAL, Ivane B. Soro de leite: um subproduto valioso. *Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes*, v. 67, n. 385, p. 64-71, 2012.

ÖZER, Barbaros; EVRENDILEK, Gulsun Akdemir. Whey beverages. Dairy Foods. *Woodhead Publishing,* 2022. p. 117-137.

PAULA, J. C. J. *Elaboração e estabilidade de bebida carbonatada aromatizada à base de soro de leite.* 2005. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

PAULA, Junio César Jacinto de; CARVALHO, Antônio Fernandes de; FURTADO, Mauro Mansur. Princípios básicos de fabricação de queijo: do histórico à salga. *Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes,* v. 64, n. 367, p. 19-25, 2009.

PEIXOTO, Lucas Silva *et al.* Filmes e revestimentos comestíveis para prolongar a vida útil dos alimentos. Ciência e tecnologia de alimentos: Pesquisas e avanços. *Agron Food Academy*, 2023. Capítulo 19. p. 203 – 213.

PELEGRINE, D. H. G.; CARRASQUEIRA, R. L. Aproveitamento do soro do leite no enriquecimento nutricional de bebidas. *Brazilian Journal Food Technology*, v. 2, p. 145-151, 2008.

PERRY, Katia SP. Queijos: aspectos químicos, bioquímicos e microbiológicos. *Química nova*, v. 27, p. 293-300, 2004.

PINHEIRO, Pedro Paulo Alves *et al.* Reutilização do soro do leite: uma alternativa sustentável. *Portalghf*, 31 janeiro. 2024. Disponível em: https://portalghf.com.br/noticia/agronegcio/2024/01/31/reutilizao-do-soro-do-leite-uma-alternativa-sustentvel/17526.html. Acesso em: 1 outubro. 2024.

PINTO, Fernanda Andrade. *Metodologia da espectroscopia no infravermelho para análise dos soros provenientes da fabricação de queijos Minas padrão e prato.* 2010. 45 p. Dissertação (Mestrado em Medicina Veterinária). UFMG – Universidade Federal de Minas Geras, Belo Horizonte, 2010.

RAMOS, Gustavo Luis de Paiva Anciens *et al.* Whey: generation, recovery, and use of a relevant by-product. In: *Valorization of agri-food wastes and by-products*. Academic Press, 2021. p. 391-414.

ROCHA, Denis Teixeira da; CARVALHO, Glauco Rodrigues; RESENDE, João Cesar de. Cadeia produtiva do leite no Brasil: produção primária. *Circular Técnica Embrapa*, v. 123, p. 1-16, 2020.

SABINO, Thiago Mazer *et al.* Coberturas à base de proteínas do soro de leite com própolis vermelha: efeito da porcentagem de plastificante na resistência à ruptura. In: CONGRESSO NACIONAL DE EXTENSÃO UNIVERSITÁRIA, 2.; ENCONTRO DE ATIVIDADES CIENTÍFICAS DA UNOPAR, 11., 2008, Londrina. *Anais[...]*. Londrina: UNOPAR, 2008.

SANTIN, Juliana. Soro do leite: o que é e benefícios para a saúde. *Milkpoint*, 2020. Disponível em: https://www.milkpoint.com.br/noticias-e-mercado/giro-noticias/beneficios-do-soro-do-leite-para-a-saude-18419n.aspx#. Acesso em: 20 de março de 2024.

SANTOS, Regiane Ribeiro *et al.* Proteína do soro de leite: Aproveitamento e aplicações na produção de embalagem biodegradável. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável,* v. 10, n. 5, p. 9, 2015.

SILVA, Bárbara Ponzilacqua *et al.* Caracterização da produção e qualidade do leite em propriedades de agricultura familiar na região sul do Rio Grande do Sul. *Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes,* v. 74, n. 4, p. 231-239, 2019.

SILVA, Fernanda Lopes *et al.* Monitoramento da distribuição do tamanho das partículas do leite integral e desnatado durante os processos de coagulação ácida ou enzimática. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 1, 2022.

SIQUEIRA, Kennya Beatriz. O mercado consumidor de leite e derivados. *Circular Técnica Embrapa*, v. 120, p. 1-17, 2019.

SIQUEIRA, KENNYA; SCHETTINO, J. P. J. O consumo de queijo pelos brasileiros. *Accessed*, v. 500, p. 2010-2017, 2021.

SMITHERS, Geoffrey W. *et al.* New opportunities from the isolation and utilization of whey proteins. *Journal of dairy science*, v. 79, n. 8, p. 1454-1459, 1996.

SOUSA, Anderson Soares de. *Leite*: Importância, Síntese e Manipulação da Composição. 2015. 24f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia). UFV - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2015.

TOSTA, Renata da Rosa *et al.* Manutenção da qualidade de morangos cv. Camarosa revestidos com cobertura comestível à base de soro de leite bovino. In: CONGRESSO NACIONAL DE EXTENSÃO UNIVERSITÁRIA, 2.; ENCONTRO DE ATIVIDADES CIENTÍFICAS DA UNOPAR, 11., 2008, Londrina. *Anais[...]*. Londrina: UNOPAR, 2008.

TSAKALI, E. *et al.* A review on whey composition and the methods used for its utilization for food and pharmaceutical products. Proc. 6th Int. Conf. Simul. *Modelling Food Bioind*, 195-201. 2010.

WIT, J. N. de. Nutritional and functional characteristics of whey proteins in food products. *Journal of dairy science*, v. 81, n. 3, p. 597-608, 1998.

1 MARQUES, Tadeu Alcides Engenheiro Agrônomo pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz em 1985.Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, em 1991, no Setor de Açúcar e Álcool, do atual LAN. Doutor em Tecnologia de Alimentos pela Universidade Estadual de Campinas em 1997, na Faculdade de Engenharia de Alimentos, setor de açucarados. Pos-Doutor em Tecnologia de Alimentos pelo Centro de Pesquisas da UNICAMP (CPQBA) em 1998 a 1999, resultando na elaboração do Aplicativo Multimídia SuKroMedia. De 1999 até 2018 docente na Faculdade de Ciências Agrárias da UNOESTE, na área de produção de biomassa para bioenergia. docente pesquisador no programa de Pós-graduação em Ciências Biológicas docente pesquisador no programa de Mestrado/Doutorado em Produção Vegetal docente pesquisador no programa de Mestrado em meio ambiente e desenvolvimento regional (MMADRE). No período teve artigos publicados, com o grupo de pesquisadores da UNOESTE USP, UNICAMP, UNESP, FATEC e alunos orientados e aprovação de Auxílio a Pesquisa junto à FAPESP, com bolsas TT1 e TT3, e aprovação de bolsas de auxílio, nível de mestrado, junto ao CNPq. Criou o Centro de Estudos Avançados em Bioenergia e Tecnologia Sucroalcooleira. Com apoio da UNOESTE, FAPESP e CNPq CENTEC/UNOESTE. Diretor desse Centro de Pesquisa (CENTEC) em 2010 até 2018. Com relação às atividades didáticas nos cursos de Graduação e Pós-Graduação, durante os anos de trabalho (1991a2014), considerando inclusive os anos em que estive afastado para cursos de Pós-Graduação, ministrou 14.462 horas de aulas em cursos de Graduação e 885 horas de aulas em cursos de Pós-Graduação. Publicou 84 artigos em periódicos especializados e 204 trabalhos em anais de eventos e apresentação em congressos. Possui 6 capítulos de livros e 3 livros publicados. Participou em 132 Bancas de defesa, sendo 6 de concurso público, 6 de doutorado, 31 de Mestrado e 178 de conclusão de curso. Possui 5 softwares e outros 111 itens de produção técnica. 38 pinturas registradas (registros de obras - site) 05 artes digitais registradas (registros de obras - site) 66 desenhos (registros de obras - site) 02 livros de romances (registros de obras - site). Participou de 74 eventos no Brasil. Orientou 18 dissertações de Mestrado e 2 Teses de Doutorados (que se transformaram em uma coorientação), além de ter orientado 19 trabalhos de iniciação cientifica e 44 trabalhos de conclusão de curso nas áreas de ciência e tecnologia de alimentos, agronomia e zootecnia. Recebeu 21 prêmios e/ou homenagens. Atuou na área sucroenergética e avaliação na produção e distribuição da bioenergia vegetal. interagiu com 205 colaboradores em coautorias de trabalhos científicos. Atualmente atua nos Cursos de Biocombustíveis e de Tecnologia de Alimentos da FATEC de Piracicaba, como professor de Ensino Superior Tecnológico e Pesquisador na área de Biocombustíveis em RJI.

2 RAMALHO, Pedro Henrique Paes. Graduando no curso Superior de Tecnologia em Alimentos pela FATEC Piracicaba Dep. "Roque Trevisan" - Centro Estadual de Educação Tecnológica "Paula Souza". Atualmente é estagiário do Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo (CENA). Tem experiência na área de Ciência e Tecnologia de Alimentos

3 REZENDE NETO, Dionísio. Graduando no curso Superior de Tecnologia em Alimentos pela FATEC Piracicaba Dep. "Roque Trevisan" – Centro Estadual de Educação Tecnológica "Paula Souza".

4 MEDINA, Marcia Nalesso Costa Jordão. Possui graduação em Engenharia Agronômica pelo Centro Regional Universitário de Espírito Santo do Pinhal (2002), mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos pela Universidade de São Paulo (2005) e doutorado em Ciências (Energia Nuclear na Agricultura) pela Universidade de São Paulo (2009). Atualmente é professora de ensino superior PIII do Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza. Tem experiência na área de Agronomia, Ciência e Tecnologia de Alimentos, Análise Sensorial, Técnicas de Conservação e Processamento de Alimentos, Operações Unitárias, Aplicações Industriais de Radioisótopos, Biocombustíveis, atuando principalmente nos seguintes temas: biocombustíveis, bioetanol/açúcar, análise sensorial e suas aplicações, irradiação de alimentos, processamento e conservação de alimentos, operações unitárias, plantas medicinais e alimentos funcionais, ecossustentabilidade, aplicação do uso de energias ionizantes e não ionizantes. Atua também como mentora de programas de mentorias de incubadora.

Determinação de açúcares fermentáveis em amostras de *Pinus sp.*, mandioca e cascas e farelo de soja como possibilidade para produção de bioetanol

VELOSO, Jhonatan Marques
DETOGNI, Maxsuillian Raimundo
BATISTA, Silvia Letícia Da Fonseca
BRANDL, Cândida
GIUSTI, Edneia Durli
AQUINO, Lucas Emanoel do Nascimento
GOMES, Sandra Inês Adams Angnes

Resumo

Com intensificação de uso do etanol, buscar formas alternativas, sustentáveis e novas tecnologias de obtenção se torna uma necessidade. Desse modo, o etanol obtido pela fermentação de açúcares comumente extraídos da cana-de-açúcar, pode ser obtido de materiais ricos em carboidratos, como grãos e leguminosas e a celulose. O processo fermentativo se diferencia da cana-de-açúcar, ou seja, primeiramente é necessário hidrolisar os carboidratos ou celulose da biomassa para a produção de açúcares. Nesse contexto, neste trabalho utilizou-se como matérias-primas Cascas de *Pinus sp.*, mandioca, cascas de mandioca e farelo de soja, abundantes na Região Sudoeste do Paraná, para investigar o teor de açúcares nessas amostras. Com este fim, adaptou-se o processo de hidrólise ácida para a quebra da celulose e de carboidratos em unidades de glicose. Os resultados apontam que as biomassas de Mandioca (24,00±0,04%), casca da mandioca (13,35±0,04%) farelo de soja (15,93±0,02%) e *Pinus sp.* (8,65±0,038%) são boas candidatas para a utilização na produção de etanol dadas as quantidades consideráveis de açúcares fermentáveis presentes nas amostras.

Palavras-chave: Etanol celulósico; Hidrólise ácida; Biomassa; Sustentabilidade.

Abstract

With the increasing use of ethanol, the search for alternative, sustainable methods and new production technologies has become essential. Thus, ethanol obtained by fermentation of sugars commonly extracted from sugarcane can also be produced from carbohydrate-rich materials such as grains, legumes, and cellulose. The fermentation process differs from that of sugarcane in that it first requires the hydrolysis of carbohydrates or biomass cellulose to release sugars. In this context, this study used *Pinus* sp. bark, cassava, cassava peels, and soybean meal—materials abundant in the Southwest region of Paraná, Brazil—as raw materials to investigate their sugar content. For this purpose, the acid hydrolysis process was adapted to break down cellulose and carbohydrates into glucose units. The results indicate that cassava (24.00±0.04%), cassava peel (13.35±0.04%), soybean meal (15.93±0.02%), and *Pinus* sp. bark (8.65±0.038%) are promising candidates for ethanol production due to the considerable amounts of fermentable sugars present in the samples.

Keywords: Cellulosic ethanol; Acid hydrolysis; Biomass; Sustainability.

Resumen

Con la intensificación del uso del etanol, se vuelve necesario buscar formas alternativas y sostenibles, así como nuevas tecnologías de producción. De este modo, el etanol obtenido por fermentación de azúcares, comúnmente extraídos de la caña de azúcar, también puede producirse a partir de materiales ricos en carbohidratos, como granos, legumbres y celulosa. El proceso fermentativo se diferencia del de la caña de azúcar en que, primeramente, es necesario hidrolizar los carbohidratos o la celulosa de la biomasa para liberar los azúcares. En este contexto, este trabajo utilizó como materias primas corteza de *Pinus* sp., mandioca, cáscara de mandioca y salvado de soya, materiales abundantes en la región Suroeste de Paraná (Brasil), para investigar el contenido de azúcares en dichas muestras. Para ello, se adaptó el proceso de hidrólisis ácida con el fin de romper la celulosa y los carbohidratos en unidades de glucosa. Los resultados indican que la mandioca (24,00±0,04%), la cáscara de mandioca (13,35±0,04%), el salvado de soya (15,93±0,02%) y la corteza de *Pinus* sp. (8,65±0,038%) son candidatas prometedoras para la producción de etanol, dadas las cantidades considerables de azúcares fermentables presentes en las muestras.

Palabras clave: Etanol celulósico; Hidrólisis ácida; Biomasa; Sostenibilidad.

INTRODUÇÃO

Uma das preocupações do mundo atual é com o suprimento de energia nas próximas décadas, uma vez que a principal fonte de energia utilizada hoje é o petróleo, combustível fóssil e não renovável. Em vista disso, outras formas de energias renováveis surgem para reduzir o uso de petróleo com o objetivo de diminuir a poluição ambiental. (Bastos, 2007; Silva; Shayani; Oliveira, 2018).

O etanol vem sendo considerado uma alternativa para diminuir problemas ambientais e energéticos a nível global, em razão da escassez e alta dos preços dos combustíveis fosseis e suas características poluentes (Araújo *et al.,* 2013; Nunes, 2017; Pacheco, 2011). O etanol possui baixa toxidade, não contém enxofre em sua composição e tem menor reatividade fotoquímica que os hidrocarbonetos do diesel e da gasolina e um teor de 34,7% de oxigênio em sua composição. Dessa forma, quando comparado com o diesel e gasolina, exige menor relação ar/combustível, gerando emissões menores de monóxido e dióxido de carbono (Schwarz, 2004).

Com intensificação do uso de etanol combustível, buscar formas alternativas de obtenção se tornou uma necessidade eminente (Ortega, 2006). O etanol é obtido pela fermentação de açúcares que comumente são extraídos da cana-de-açúcar. Entretanto, há outras matérias ricas em carboidratos, como grãos, leguminosas e a celulose, que podem ser utilizados como fonte de açúcares fermentáveis para produção de álcool etílico (Aquino *et al.,* 2014; Martins, 2015). O processo fermentativo difere da fermentação da cana-de-açúcar, é realizado por meio de hidrólise dos carboidratos e da celulose. O processo de hidrólise pode ser enzimático ou hidrólise através de ácidos ou bases (Martins, 2015).

Nesse contexto, o crescimento do consumo de energia tem despertado interesse na conversão de biomassa em energia, em especial que seja também economicamente viável (Ortega, 2006). Embora no Brasil o uso da cana-de-açúcar na produção do etanol seja bem-sucedida, a utilização de resíduos agrícolas e outras fontes alternativas de substratos pode ser interessante no processo de obtenção de combustíveis renováveis, como o bioetanol, que tem ganhado grande interesse, principalmente se associado à indústria já existente (Ferronato, 2017; Gomes, 2014).

De acordo com Pacheco (2011), diante da perspectiva de um aumento significativo na demanda por etanol e da necessidade de evitar a competição pelo uso da terra para a geração de energia e produção de alimentos, especialmente em regiões que não dispõem de clima favorável ou

extensão territorial para o cultivo, torna-se cada vez mais necessário investir no desenvolvimento de tecnologias de segunda geração de produção de etanol.

Nesse cenário, tecnologias capazes de melhorar o desempenho da produção de bioetanol ganham importância fundamental no país (Pacheco, 2011). Tendo isso em vista, este trabalho teve como objetivo investigar diferentes fontes de carboidratos para produção de etanol lignocelulósico a partir da conversão da celulose e hemicelulose em etanol, uma tecnologia de segunda geração. Nesse sentido, o trabalho aborda possibilidades e metodologias para aproveitamento de resíduos de *Pinus sp.*, mandioca e farelo de soja para a produção de bioetanol, uma vez que esta nova geração de combustível apresenta vantagens ambientais e econômicas.

A produção de Etanol com Biomassa Alternativa

A produção brasileira de etanol de cana-de-açúcar é um dos mais bem sucedidos programas de combustíveis alternativos já desenvolvidos no planeta. Em 2009, o Brasil era considerado o segundo maior produtor de etanol do mundo, e ainda é o único país do mundo que dispõe uma ampla frota de veículos bicombustíveis.

A importância econômica da indústria alcooleira no Brasil está diretamente ligada à indústria da cana-de-açúcar. Tanto a indústria alcooleira quanto a indústria açucareira se desenvolveram lado a lado, pois foram os primeiros tipos de indústrias manufatureiras implantadas no Brasil, sendo possível encontrá-las praticamente em todo o país (Lima, 1975).

Apesar da cana-de-açúcar ser a matéria-prima majoritária no processo de produção de etanol, qualquer produto que se constitua de açúcar ou outro carboidrato é uma fonte em potencial para obtenção do etanol, como matérias açucaradas agrupando cana, beterraba, frutas e outros. Também temos matérias amiláceas e feculentas como amido de grãos, a fécula de raízes e tubérculos. E, por fim, materiais celulósicos que incluem palhas, madeiras, resíduas agrícolas e outros (Lima, 1975).

Uma das principais matérias-primas usada para produção do etanol celulósico é a biomassa composta pelos rejeitos e resíduos das colheitas e do processamento de vegetais, que geralmente não é reaproveitada para alimentação humana e animal ou para outras finalidades (Shreve, 2008).

Dentre as possibilidades de biomassa para produção de bioetanol, nesse trabalho dá-se destaque a mandioca, farelo de soja e ao resíduo de madeiras, o *Pinus sp.* A mandioca é um dos recursos naturais renováveis que são cultivados em muitos países, sendo o sexto produto alimentar

da humanidade, em volume de produção. As cascas geralmente são descartadas na natureza como resíduo ou destinadas ao consumo animal. Entretanto, este resíduo dispõe de uma boa carga de amido que poderia ser utilizada no processo de obtenção de açúcares redutores, gerando uma economia pela autossuficiência de produção de álcool (Chielle, 2005; Reis, 1987).

Outra fonte rica em carboidratos, de acordo com Silva *et al.* (2006) e Runho (2001) é o farelo de soja, resíduo gerado da prensagem da soja na produção de óleo e geralmente empregado em rações animais. Segundo os autores a composição química e valor proteico do resíduo de soja apresenta 33,10 % de carboidratos, 46,7 % de proteínas, 1,67 % de lipídeos.

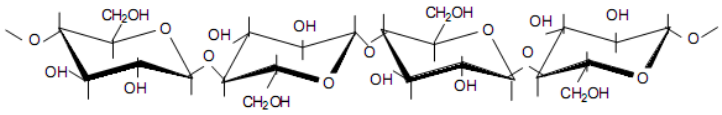
Segundo a Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF, 2012), 0,88% do solo brasileiro está ocupado com plantações de cana-de-açúcar, a principal matéria prima para a produção de etanol, vindo logo atrás ocupando 0,74% do solo brasileiro as florestas plantadas com inúmeras variedades de *Pinus* e eucalipto. O Paraná vem em terceiro lugar em florestas plantadas com *Pinus* e eucalipto no Brasil, sendo a sua maioria *Pinus*.

Segundo Klock, Muniz, Andrade (2005), as indústrias madeireiras, geram grandes quantidades de resíduos. Estes resíduos possuem entre 40 a 50% de celulose, sendo uma possível fonte alternativa para geração de açúcares fermentáveis para a fabricação de etanol.

A celulose é o principal constituinte da parede das células vegetais e é, quantitativamente, o composto orgânico mais abundante no planeta: estima-se que mais de 50% do carbono da biosfera esteja presente nas moléculas de celulose (Lehninger, 2002). Assim, o etanol celulósico (Ceetol) ou etanol de lignocelulose é obtido a partir da quebra das cadeias da celulose, hemicelulose e pectina, polímeros que constituem a estrutura fibrosa dos vegetais, através de reações químicas ou bioquímicas (Pacheco, 2011; Shreve, 2008).

De acordo com Lehninger (2002), é um polissacarídeo que se apresenta como um polímero de cadeia linear e não ramificado, de 10 a 15 mil unidades de D-glicose apresentando configuração β, assim formando ligações glicosídicas do tipo β1>4, Figura 1.

Figura 1: Fórmula estereoquímica da celulose



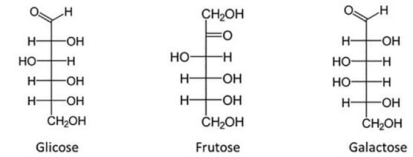
Fonte: Lehninger (2002).

A hidrólise da celulose fornece açúcares que são comercialmente recuperáveis para fins diversos como para produção de leveduras, ou ainda para fermentação e obtenção de etanol. Nesses processos os custos dos ácidos são fatores importantes, e são geralmente utilizados ácidos diluídos a baixas concentrações (Andrade, 2005; Barcza, 2009; Lehninger, 2002).

Já os hidratos de carbono, ou carboidratos se caracterizam por conterem uma função cetona ou aldeído e dois ou mais grupos hidroxila unidos a uma cadeia de átomos de carbono, podem ser classificados em monossacarídeos, oligossacarídeos e polissacarídeos (Lehninger, 2002).

Os monossacarídeos ou açúcares simples são, geralmente, de sabor adocicado e podem ser constituídos de três, quatro, cinco ou seis átomos de carbono, denominadas trioses, tetroses, pentoses e hexoses (Figura 2), respectivamente (Lehninger, 2002).

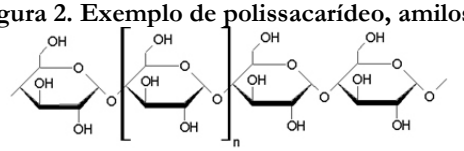
Figura 1. Exemplo de monossacarídeos



Fonte: Lehninger (2002).

Os polissacarídeos são formados por mais de 20 unidades de monossacarídeos ligadas entre si, podemos citar os mais comumente estudados sendo o amido e a celulose (Figura 3).

Figura 2. Exemplo de polissacarídeo, amilose



Fonte: Fonte: Lehninger (2002).

O amido pertence à classe dos carboidratos, é um polissacarídeo, formado por meio da união de várias unidades de D-glicose. Sendo a principal fonte de armazenamento de energia nas plantas, está presente em frutos, tubérculos, sementes e raízes. Sendo constituído por duas moléculas de polissacarídeos ligeiramente diferentes, amilose e amilopectina, que somente podem ser evidenciados após solubilização e separação dos grânulos. Vale mencionar que o amido é o maior constituinte de batatas, ervilhas, feijões, arroz, milho, mandioca e farinha (Bruice, 2006).

Considerando que o etanol pode ser produzido a partir de celulose e carboidratos presentes em diferentes matérias-primas, por exemplo em resíduos vegetais, este trabalho apresenta uma metodologia para a caracterização e quantificação dos açúcares presentes nas amostras de

Pinus sp., mandioca, cascas de mandioca e farelo de soja, como possibilidade para produção de etanol celulósico.

DESENVOLVIMENTO

Todos os experimentos foram realizados em triplicata independente (n = 3). Os resultados foram expressos como média ± desvio padrão (DP). A média foi obtida a partir dos valores individuais de cada repetição, enquanto o desvio padrão foi calculado para representar a dispersão dos dados em relação à média. Este procedimento visa garantir a reprodutibilidade e a confiabilidade dos resultados obtidos.

Coleta e Preparo das Amostras de *Pinus sp.*, Mandioca e Farelo de Soja

Os cavacos (restos de madeira de troncos e galhos, casca da árvore devidamente moídos), foram fornecidos pela empresa madeireira Odilon Scopel ME Indústria de Compensados, localizada na região de Palmas, sul do estado do Paraná. As amostras de mandioca foram adquiridas na empresa, Aipim Congelado, Oracílio de Souza, na cidade de Palmas, Paraná. O farelo de soja foi fornecido pela empresa Santa Rosa, do município de Clevelândia, Paraná. Todas as amostras foram previamente secas a 105ºC.

Descristalização da Celulose

Para o preparo das amostras seguiu-se a metodologia proposta pela Universidade Federal do Paraná (UFPR) – Fichas para Prática de Análises Químicas da Madeira (2008):

- 1ª etapa: Coletou-se um volume considerável do material a ser analisado;

- 2ª etapa: A umidade foi determinada considerando a massa da amostra úmida e a amostra seca por vinte e quatro horas em estufa a temperatura de 105ºC**,** por meio do cálculo: $RS = {}^{Mf}/_{Mi} * 100$.

- 3ª etapa: Com as amostras secas preparou-se em erlenmeyers as proporções em m/v de 1/3; 1/6 e 1/9 de amostra/ácido sulfúrico.

Após o preparo das amostras para o processo de descristalização com ácido sulfúrico 30%; 15%, 7%, 5% e 2%, submeteu-se as amostras com as proporções em m/v de 1/3; 1/6 e 1/9

de amostra/ácido sulfúrico a autoclave sob pressão de 1,5 Kgf por uma hora, 30 minutos, 15 minutos e 10 minutos a 127^0C. Em seguida, filtrou-se a amostra, separando o resíduo do líquido obtido, registrando a quantidade do líquido. Neutralizou-se a mostra com auxílio de hidróxido de amônia, deixando o pH entre 5 a 7, para não interferir nos testes qualitativos e quantitativos.

Caracterização dos Açúcares Obtidos da Celulose

A caracterização dos açúcares obtidos da celulose segue a metodologia proposta por Oliveira (2009).

Teste de Fehling

O teste de Fehling (Quadro 1) consiste na identificação do grupo aldeído, através de sua oxidação a ácido. O reagente de Fehling contém $Cu(OH)_2$ (hidróxido de cobre II) que, em presença de um açúcar redutor, passa a Cu_2O (óxido de cobre I), precipitado avermelhado ou amarelado.

Quadro 1. Teste Fehling

- ✓ Reagente de Fehling A: 34,65 g de $CuSO_4.5H_2O$ (sulfato de cobre II) em 500 mL de água.
- ✓ Reagente de Fehling B: 173 g de sal de Rochelle e 50 g de NaOH (Hidróxido de sódio) em 500 mL de água.
- ✓ Adicionou-se num tubo de ensaio 1 mL da solução de sulfato de cobre II (solução A) e 1 mL de solução alcalina de tartarato duplo de sódio e potássio (solução B). Adicionou-se1 mL da solução a ser testada.
- ✓ Aqueceu-se por 5 min. em água fervente. Observou-se a formação ou não de precipitado avermelhado.

Teste de Seliwanoff

A reação positiva para o teste Seliwanoff (Quadro 2) é caracterizada pelo aparecimento de coloração avermelhada, que indica a formação do complexo entre furfural (HMF) com o resorcinol e, consequentemente, indica presença de aldoses e cetoses.

Quadro 2. Teste Seliwanoff

- ✓ Preparo do reagente de Seliwanoff: dissolve-se 0,025 g de resorcinol em 50 mL de ácido clorídrico (HCl) concentrado. Completou-se o volume para 100 mL.
- ✓ Adicionou-se 3 mL do reagente de Seliwanoff e 1 mL da amostra;
- ✓ Aqueceu-se todos os tubos em banho-maria fervente por um minuto e observou-se a coloração desenvolvida;
- ✓ Ferveu-se por mais 5 minutos e anotou-se a coloração desenvolvida;
- ✓ Comparou-se os resultados.

Quantificação de Açúcares Redutores por Método Eynon-lane

a) Determinação do Título do Licor de Soxhlet

O licor de Soxhlet foi preparado no momento da análise de acordo com Sant'ana *et al.* (2005), juntando-se volumes iguais de uma solução de sulfato de cobre (solução A) e de uma solução de tartarato duplo de sódio e potássio alcalino (solução B), conforme indica o preparo no Quadro 3.

Quadro 3. Preparo das soluções

Solução A: pesou-se 34,639 g de sulfato de cobre, puro e cristalizado; dissolvendo-o e completando o volume a 500 mL, com água destilada. Solução B: Pesou-se 50 g de NaOH/ dissolveu-se em 200 mL de água destilada. Pesou-se 173 g de tartarato duplo de sódio e potássio e dissolveu-se na solução de NaOH, completando o volume para 500mL, deixando em repouso por 24 horas, para posterior filtrar. Solução de glicose: pesou-se 5 g de glicose anidra para análise, dissolveu-se e completou-se o volume para 1000 mL com água destilada. Solução de azul de metileno: dissolve-se 1 g de azul de metileno puríssimo em água destilada e completou-se o volume para 100 mL.

Durante o procedimento seguiu-se os passos abaixo:

- ✓ Tomou-se volumes iguais da solução "A" e "B" (25 mL de cada – colocar a sol. B primeiro) em um erlenmeyer.
- ✓ Tomou-se 10 mL da solução obtida (solução "A" e "B") em um Erlenmeyer, adicionou-se ± 100 mL de água destilada e levou-se ao fogo até ebulição.
- ✓ Adicionou-se a solução de glicose pura à bureta, e começou-se a gotejar sem paralisar a ebulição, até obter uma coloração pardo-avermelhada.
- ✓ Esperou-se 2 minutos em ebulição.
- ✓ Adicionou-se 3 gotas de azul de metileno a 1%.
- ✓ A cor volta a ficar azul e continuou-se a titulação até cor pardo-avermelhada.
- ✓ Anotou-se o volume gasto de glicose.
- ✓ Reiniciou-se o método no item por pelo menos 5 vezes.

Cálculo do título:

Desprezou-se a primeira leitura, bem como todas aquelas que derem resultados disparatados, e estabeleceu-se a média aritmética das outras.

O Quadro 4 apresenta a fórmula para determinação da massa de glicose necessária para redução do cobre de 10 mL do licor.

Quadro 4. Fórmula para determinação do título

$$M: \frac{N2 + N3 + N4 + Nn}{n}$$

5 g de glicose --------- 1000ml
X g de glicose --------- M

Então: X: 5. M: g de glicose (1)
1000
X g de glicose reduzem o cobre de 10 ml do licor, 1 ml do licor será reduzido
Por T (título).

Fonte: Sant'ana; Gomes; Evangelista (2005).

b) Determinação de Açúcar Redutor na Amostra

Repetiu-se o mesmo procedimento anterior (a) para a padronização, só que com a amostra a ser analisada, que foi diluída na proporção de 1/5.

DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Abertura da amostra – análise preliminar

Com o objetivo de identificar e quantificar os açúcares nas amostras *Pinus sp.*, do farelo de soja e da mandioca adaptou-se o método proposto por Schneider & Hörner (1979) a partir de testes preliminares variando as proporções de amostra para ácido sulfúrico de p/v 1/9; 1/6 e 1/3 para as seguintes concentrações, 30%, 15%, 7%, 5% e 2%, com a variação de tempo de 1 hora, 30 minutos, 15 minutos e 10 minutos em autoclave a 1,5 Kgf/cm² à 127ºC.

Para a amostra de *Pinus sp.*, as amostras foram auto-clavadas por 1h a pressão, com concentração de ácido de 2 %.

Para o farelo de soja, os melhores resultados com menores gastos energéticos foram obtidos a partir da utilização da solução de ácido sulfúrico com a concentração de 7%, com 30 minutos de autoclave.

Para as amostras de mandioca, os melhores resultados com menores gastos energéticos foram obtidos a partir da utilização da solução de ácido sulfúrico com a concentração de 7% com 15 minutos de autoclave.

Resultados Qualitativos Obtidos na Caracterização dos Açúcares Extraídos da Celulose

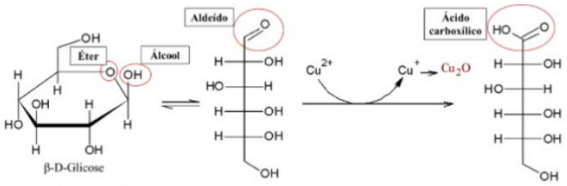
Após a abertura das amostras, o líquor com coloração amarelo-esverdeada foi diluído com água destilada na ordem de 1/5 p/v, de acordo com as recomendações de Sant'ana; Gomes; Evangelista (2005).

Na sequência realizaram-se os testes qualitativos de Benedict, Fehling e Seliwanoff, para indicação de carboidratos.

Teste de Fehling

O teste de Fehling consiste na identificação do grupo aldeído, através de sua oxidação a ácido carboxílico (Figura 4). O reagente de Fehling contém, hidróxido de cobre II [$Cu(OH)_2$], que em presença de um açúcar redutor, passa a reduzir a óxido de cobre I, Cu_2O, dando teste positivo quando ocorre a formação de um precipitado avermelhado ou amarelado.

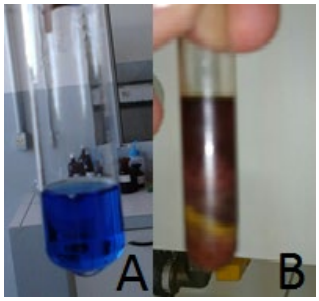
Figura 4. Reação do teste de Fehling



Fonte: Fonte: Lehninger (2002).

A Figura 5 (A) apresenta o resultado para teste de Fehling em amostra branca; A Figura 5 (B) teste de Fehling positivo. Para todas as amostras, o resultado foi positivo, comprovando a identificação do grupo aldeído

Figura 5. (A) Teste de Fehling em amostra branca (negativo); (B) Teste de Fehling positivo

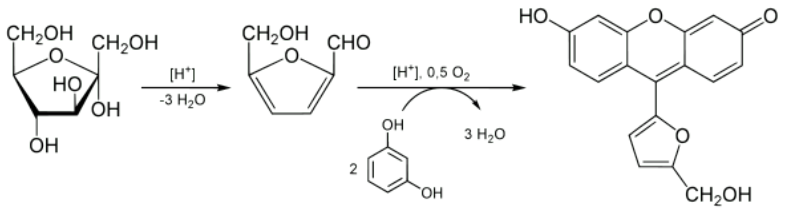


Fonte: dados da pesquisa.

Teste de Seliwanoff

No teste de Seliwanoff, a reação positiva é caracterizada pelo aparecimento de coloração avermelhada, que indica a formação do complexo furfural com o resorcinol, (Figura 6), consequentemente, indicando a presença de aldoses e cetoses.

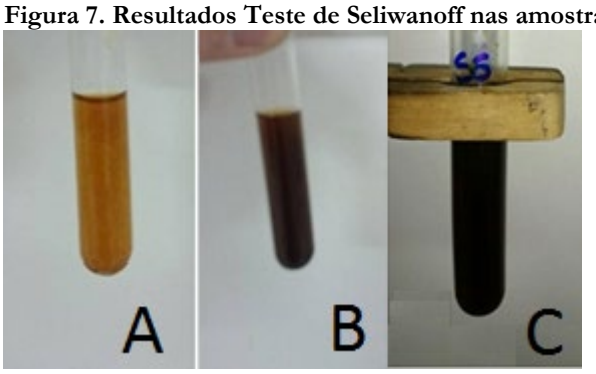
Figura 6. Reação de formação do complexo de furfural no teste de Seliwanoff



Fonte: Lehninger (2002).

As Figuras, 7(A) teste de Seliwanoff em amostra branca (negativo); 7 (B,C) teste de Seliwanoff positivo para todas as amostras investigadas.

Figura 7. Resultados Teste de Seliwanoff nas amostras



Fonte: dados da pesquisa.

A Tabela 1, mostra os melhores resultados qualitativos obtidos na digestão das amostras analisadas no processo de investigação de açúcares.

Tabela 1. Testes preliminares para identificação de açúcares em amostras de mandioca, farelo de soja e *Pinus, sp.*

Proporção Amostra / H_2SO_4	Mandioca seca	Casca de mandioca seca	Farelo de soja *in natura*	Farelo de soja seco	Cavaco *Pinus sp. in natura*	Cavaco *Pinus sp.* Seco	Cavaco Moído *Pinus sp. in natura*	Cavaco Moído *Pinus sp.* Seco
1/3	Fehling (+) Seliwanoff (+)	Fehling (+) Seliwanoff (+)	Fehling (-) Seliwanoff (+)	Fehling (-) Seliwanoff (+)	Fehling (-) Seliwanoff (+)	Fehling (-) Seliwanoff (-)	Fehling (-) Seliwanoff (-)	Fehling (-) Seliwanoff (-)
1/6	Fehling (+) Seliwanoff (+)	Fehling (+) Seliwanoff (+)	Fehling (+) Seliwanoff (+)	Fehling (+) Seliwanoff (+)	Fehling (+) Seliwanoff (+)	Fehling (+) Seliwanoff (+)	Fehling (+) Seliwanoff (+)	Fehling (+) Seliwanoff (+)
1/9	Carb.	Carb.	Carb.	Carb.	Carb.	Carb.	Carb.	Carb.

*Carb: carbonização.
Fonte: dados da pesquisa.

Após a realização de todos os testes prévios, manteve-se constante as condições da hidrólise e a melhor proporção 1/6 (amostra/ácido sulfúrico) para: *Pinus sp.*, auto-clavado por 1h em auto-clave com ácido sulfúrico 2 %; Farelo de soja com ácido sulfúrico 7%, e 30 minutos em autoclave; Amostras de mandioca, com ácido sulfúrico 7% e 15 minutos de autoclave. Na sequência quantificou-se o teor de açúcares das amostras obtidas nas condições de trabalho, utilizando o método de Eynond-Lane.

Resultados Obtidos na Quantificação de Açúcares Redutores por Método Eynond-Lane

As concentrações investigadas para o H_2SO_4 variaram entre 2% a 30%. Pode-se observar, que o rendimento de glicose foi praticamente o mesmo para as amostras: na Tabela 2 o farelo de soja, na Tabela 3 o *Pinus sp.* e na Tabela 4 para as amostras de mandioca.

As amostras de *Pinus sp.*, farelo de soja e mandioca submetidas a digestão com H_2SO_4 30% não apresentaram resultados positivos, pois houve carbonização total das biomassas. Isso provavelmente ocorreu devido ao excesso de ácido envolvido na reação aliado a alta temperatura, promovendo a degradação da mesma.

Tabela 2. Média de rendimento da digestão do farelo de soja *in natura* e seco em açúcares redutores (%) em relação a concentração do ácido sulfúrico em 30 min. de autoclave a 1,5 Kgf/cm² à 127 ºC

	% de glicose					
Concentração do Ácido	**Farelo 1/3**	**Farelo 1/6**	**Farelo 1/9**	**Farelo seco 1/3**	**Farelo seco 1/6**	**Farelo seco 1/9**
H_2SO_4 2%	9,11% ± 0,03	9,86% ± 0,03	9,39% ± 0,03	10,59% ± 0,03	10,53% ± 0,03	10,39% ± 0,03
H_2SO_4 5%	9,80% ± 0,03	9,25% ± 0,03	9,22% ± 0,03	10,63% ± 0,02	10,01% ± 0,03	10,81% ± 0,02
H_2SO_4 7%	8,70% ± 0,03	13,30% ± 0,12	Carb.	15,65% ± 0,03	15,93% ± 0,02	Carb.
H_2SO_4 15%	9,60% ± 0,12	10,32% ± 0,08	Carb.	11,07% ± 0,09	11,55% ± 0,01	Carb.
H_2SO_4 30%	Carbonização da amostra					

Fonte: dados da pesquisa.

Tabela 3. Média de rendimento da digestão do *Pinus sp.* em açúcares redutores (%) em relação a concentração do ácido (1/6) em 1 h de autoclave a 1,5 Kgf/cm² à 127 ºC

	% de glicose			
Concentração do Ácido	**Cavaco In natura**	**Cavaco Seco**	**Cavaco Moído In natura**	**Cavaco Moído Seco**
H_2SO_4 2%	7,81% ± 0,031	8,40% ± 0,034	7,86% ± 0,033	8,65% ± 0,038
H_2SO_4 5%	7,80% ± 0,035	8,25% ± 0,039	7,82% ± 0,036	8,53% ± 0,025
H_2SO_4 7%	7,00% ± 0,038	7,30% ± 0,122	6,77% ± 0,013	7,35% ± 0,037
H_2SO_4 15%	5,87% ± 0,105	6,81% ± 0,088	5,90% ± 0,058	7,10% ± 0,097
H_2SO_4 30%	Carbonização da amostra			

Fonte: dados da pesquisa

Tabela 4. Média de rendimento da digestão da mandioca e da casca de mandioca em açúcares redutores (%) em relação a concentração do ácido utilizado em 15 min. de autoclave a 1,5 Kgf/cm² à 127ºC.

	% de glicose					
Concentração do Ácido	**Mandioca 1/3**	**Mandioca 1/6**	**Mandioca 1/9**	**Casca de Mandioca 1/3**	**Casca de Mandioca 1/6**	**Casca de Mandioca 1/9**
H_2SO_4 2%	22,84% ± 0,03	22,83% ± 0,03	21,99% ± 0,03	12,59% ± 0,04	12,53% ± 0,04	12,39% ± 0,03
H_2SO_4 5%	22,85% ± 0,03	22,85% ± 0,04	22,00% ± 0,04	12,53% ± 0,02	13,01% ± 0,03	12,39% ± 0,03
H_2SO_4 7%	24,00% ± 0,04	23,33% ± 0,12	Carb.	13,35% ± 0,04	12,93% ± 0,02	Carb.
H_2SO_4 15%	21,40% ± 0,11	21,33% ± 0,08	Carb.	12,00% ± 0,10	12,00% ± 0,01	Carb.
H_2SO_4 30%	Carbonização da amostra					

Fonte: dados da pesquisa.

A amostra que apresentou melhor rendimento foi na mandioca, na proporção de 1/3 e 1/6 de amostra/ácido sulfúrico 7%, com respectivamente 23,33±0,12% a 24,00±0,04% de açúcares. Já

a casca da mandioca apresentou rendimentos de 12,93±0,02% a 13,35±0,04% nas mesmas condições; em seguida, o farelo de soja previamente seco a 105ºC, apresentou o rendimento máximo de 15,93±0,02% de glicose. Levando em consideração que essas amostras são ricas em açúcares, como, por exemplo, a sacarose que é um dissacarídeo não redutor facilmente hidrolisado em glicose e frutose, a rafinose ou galactosilsacarose que é um oligossacarídeo não redutor e sua hidrólise resulta em frutose, glicose e galactose e a estaquiose, que é um tetrassacarídeo da mesma família da rafinose (Qureshi *et al.,* 2001).

Quanto as amostras de *Pinus ps.,* o melhor rendimento foi obtido com o cavaco moído e previamente seco, com 8,65±0,038% de glicose na proporção de 1/6 de amostra para ácido sulfúrico 2%, provavelmente relacionado a maior superfície de contato.

De forma geral, observou-se maior rendimento de glicose na mandioca e na casca da mandioca, na proporção 1/6 ácido sulfúrico 7%. Portanto, se levado em consideração os menores gastos energéticos, pode-se dizer que as amostras na proporção 1/3 ácido sulfúrico 2% apresentaram os melhores resultados, com determinação de uma quantidade relevante de glicose.

De forma geral, o rendimento de açúcares nas amostras de *Pinus sp.*, mandioca e farelo de soja é considerado baixo quando comparado com o rendimento de outros materiais celulósicos por processos similares, como por exemplo a casca de arroz que tem seu rendimento médio em torno de 20% (Schneider; Hörner, 1979). Contudo, se levarmos em consideração o que descreve Klok et *al.*, (2005), a fração hidrolisável por ácidos de uma amostra de celulose representa cerca de l0 a l2% de seu peso em açúcares. Desse modo, obteve-se o rendimento superior de açúcares nas amostras avaliadas pela adaptação do método de Schneider & Hörner (1979).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho mostra a importância de investimentos em novas tecnologias de segunda geração que explorem o potencial de matérias-primas vegetais além da cana-de açúcar, principalmente biomassas residuais ricas em carboidratos hidrolisáveis e resíduos celulósicos com valor agregado e que podem ser reaproveitados em processos fermentativos para produção de etanol.

Nesse sentido, este estudo apresenta a hidrólise da celulose e outros carboidratos, presentes em biomassas de *Pinus sp.* mandioca e farelo de soja a partir de um pré-tratamento, o preparo do substrato (o líquor obtido do processo) e ajustes de pH. Assim, estudos futuros, merecem atenção

para o desenvolvimento de um processo simples, com ajustes de pH e temperatura para fermentação dos açúcares presentes no caldo hidrolisado obtido a partir desses resíduos, e a recuperação e purificação do etanol produzido, por destilação.

A primeira etapa da hidrólise proposta nesse estudo é, tecnicamente, a mais difícil, uma vez que a digestibilidade da celulose é dificultada por fatores físicos, químicos, estruturais e composicionais. Diante disso, percebe-se que é indispensável o pré-tratamento da biomassa para facilitar a obtenção de açúcares potencialmente fermentescíveis na etapa de hidrólise.

REFERÊNCIAS

AQUINO, Annelyse Farias et al. O etanol da cana de açúcar: possibilidades energéticas da região de Ceará-Mirim-RN. *Holos*, v. 1, p. 105-125, 2014.

ARAUJO, Geraldo Jose Ferraresi de et al. O etanol de segunda geração e sua importância estratégica ante o cenário energético internacional contemporâneo. *Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista*, v. 9, n. 5, 2013.

BASTOS, Valéria Delgado. Etanol, alcoolquímica e biorrefinarias. *Banco Nacional de Desenvolvimento Economico e Social Setorial,* Rio de Janeiro, n 25, p. 5-38, 2007.

BARCZA, Marcos Villela. Escola de Engenharia de Lorena EEL-USP. *Hidrólise***,** 2009.

BRUICE, Paula Yurcanis. *Química orgânica*. v. 2. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2006. P.75-76. Cap. 9.

CHIELLE, Z. G. Potencialidades e Agronegócio da Cultura da Mandioca. *In*: REUNIÃO TÉCNICA DE MANDIOCA, 5, 2005, Cruzeiro do Sul/RS. *Ata... s. n.* Cruzeiro do Sul, 2005.

FERRONATO, Jéferson. *Potencial do Panicum maximum para produção de bioetanol*. 67 p. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Energias Renováveis) – Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé, Bagé, 2017.

FRANCISCO JUNIOR, Wilmo E**.** Carboidratos: Estrutura, Propriedades e Funções, 29 ed. *QUÍMICA NOVA NA ESCOLA*, 2008.

GOMES, W. C. *Produção de bioetanol a partir da amêndoa da semente da manga* (Mangifera indica L.). 2014. 109 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2014.

KLOCK, Umberto; MUNIZ, Gib de. H. J. A.; ANDRADE, A. S. de. *QUÍMICA DA MADEIRA*. 3ª. Edição revisada. Universidade Federal do Paraná Setor de Ciências Agrárias Departamento de engenharia e Tecnologia Florestal Curitiba, 2005.

LEHNINGER, Albert L. *Princípios de Bioquímica.* 3. Ed. São Paulo: Sarvier, 2002.

LIMA, Urgel de A. *Tecnologia das fermentações*, São Paulo-SP, Vol.1, Edgard Blücher, 1975.

MARTINS, Rhodiney Vaz. Etanol de beterraba. *Intr@ ciência–Revista Científica***.** 10 Edição, 2015.

NUNES, Elis Fernando. *Cana-de-Açúcar*: a produção de etanol e seus benefícios. Monografia (Técnico em Agronegócios). Instituto Federal de Ciências e Tecnologia de São Paulo. Barretos, 2017.

OLIVEIRA, M A. *Análise química de Açúcares.* Cachoeira de Itapemirim: Noryam, 2009.

PACHECO, Thályta Fraga. Produção de etanol: primeira ou segunda geração? *Circular Técnica 04*. Brasília, abril, 2011.

REIS, A. J. Aspectos Econômicos da Mandioca. *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v.13, n.145, p. 3-8, 1987

SANT'ANA, L.; GOMES, M. I. F.V.; EVANGELISTA, R, M.. *Apostila de Práticas de Bromatologia para o Curso de Nutrição.* UNESP - UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - CAMPUS DE BOTUCATU, 2005.

SCHNEIDER, Ilzemaro; HÖRNER, Manfredo. Aproveitamento da casca de arroz para a obtenção de álcool. *Revista do Centro de Ciências Rurais*, v. 9, n. 3, 1979.

SCHWARZ, A. Avaliação da Expansão da Produção de Etanol no Brasil. 2004. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2004. *5 Comunicação ao CGEE, Consultor (Meio Ambiente*). p. 24. 2004

SHREVE, Randolph Norris; BRINK JR., Joseph A. *Indústrias de processos químicos.* 4. ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 1977

SILVA, M. S.; et al. Composição química e valor proteico do resíduo de soja em relação ao grão de soja. *Ciência Tecnologia Alimentos*, Campinas, v. 26, n. 3, p. 571-576, jul.-set. 2006.

SILVA NETTO, Eraldo Ferreira da; SILVA LEAL, Francis Pinheiro da. Biocombustíveis: uma vantagem para o futuro. *Bolsista de Valor*, v. 2, p. 11-16, 2012.

SILVA, Lara Raquel de Jesus Rodrigues; SHAYANI, Rafael Amaral; OLIVEIRA, Marco Aurélio Gonçalves de. Análise comparativa das fontes de energia solar fotovoltaica, hidrelétrica e termelétrica, com levantamento de custos ambientais. In: *Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS*. 2018.

ÚNICA, União da Indústria da cana de açúcar. *Flex: etanol puro ou com gasolina***,** 2008.

1 VELOSO, Jhonatan Marques. Graduado em Licenciatura Plena em Química pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná. Licenciado em Ciências Biológicas na Universidade Cruzeiro do Sul. Especialização em Ciências Marinhas Aplicadas ao Ensino pelo Instituto Federal de Santa Catarina. Experiência na área de Química, com ênfase em Química Orgânica.

2 DETOGNI, Maxsuillian Raimundo. Mestre em Química pela Universidade Estadual de Londrina (UEL). Graduado em Química (licenciatura), pelo Instituto Federal do Paraná (IFPR) - Campus Palmas, Atua em pesquisas relacionadas a química orgânica, química analítica e ensino de Química.Professor de Química, Matemática e Educação Financeira na Secretaria de Educação e Esporte - SEED.

3 BATISTA, Silvia Letícia Da Fonseca. Graduada em Licenciatura Plena em Química pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná.

4 BRANDL, Cândida Alissia. Licenciada em Química pelo Instituto Federal Farroupilha, Campus Panambi. Doutora em Química pela Universidade Federal de Santa Maria. Especialista em educação de jovens e adultos e Coordenação Pedagógica e Supervisão Escolar. Docente do Curso de Graduação em Química do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico do Instituto Federal do Paraná, Campus Palmas.

5 GIUSTI, Edneia Durli. Graduada em Ciências Habilitação Química pelo Centro Pastoral Educacional e Assistência Dom Carlos. Mestre em Química pela Universidade Federal do Paraná. Docente do Curso de Graduação em Química do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico do Instituto Federal do Paraná, Campus Palmas.

6 Aquino, Lucas Emanoel do Nascimento. Bacharel em Química pela Universidade Federal de Alagoas. Licenciado em Química pelo Programa Especial de Formação Pedagógica de Docentes em Química do Centro Universitário Claretiano. Tecnólogo em Análise e Desenvolvimento de Sistemas pela Unicesumar. Doutor em Química na Universidade Federal do Paraná. Docente do Curso de Graduação em Química do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico do Instituto Federal do Paraná, Campus Palmas.

7 Gomes, Sandra Inês Adams Angnes. Graduada em Ciências Habilitação Química pelo Centro Pastoral Educacional e Assistência Dom Carlos. Mestre em Química pela Fundação Universidade de Blumenau. Docente do Curso de Graduação em Química do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico do Instituto Federal do Paraná, Campus Palmas.

Produção de biodiesel a partir de resíduos agropecuários e industriais – uma alternativa sustentável

HONÓRIO, Glaucio Gualtieri

Resumo

Devido os problemas relacionados à queima de combustíveis fósseis, como a emissão de gases estufa e o consequente aquecimento do planeta, a sociedade lança-se na busca por fontes alternativas de energia que agridam menos o meio ambiente, com destaque para a energia proveniente da biomassa. Entre essas, pode-se citar o biodiesel, um biocombustível capaz de substituir o diesel de petróleo, que é produzido a partir de óleos vegetais e gorduras animais através de um processo de transesterificação. Apesar de uma produção bem estabelecida a partir de plantas oleaginosas, sobretudo a soja, é desejável uma produção mais sustentável deste biocombustível, que não comprometa grandes áreas para o cultivo. Aliado a tal fato, toneladas de resíduos alimentares são produzidas no mundo diariamente, e a destinação final de tais resíduos pode-se tornar problemática, tanto do ponto de vista ambiental, quanto econômico e social. Dessa forma é crescente a busca pelo reaproveitamento de óleos e gorduras residuais para a produção do biodiesel, com destaque para óleo de fritura usado, além óleo da indústria de pescado e gordura de aves, além do uso de resíduos em processos de catálise. O presente estudo busca, através de uma revisão bibliográfica, esclarecer o uso de matéria prima residual para a produção de biodiesel de segunda geração, bem como o uso de material alternativo residual em processos catalíticos. Conforme apresentado, resíduos de óleos e gorduras apresentam excelentes resultados, o que os credenciam como eficientes fontes alternativas para a produção de biodiesel em comparação às oleaginosas, tornando o processo mais sustentável.

Palavras-chave: Biodiesel, Óleo residual; Biocombustível 2G; Resíduos alimentares; Bioenergia.

Abstract

Due to the problems related to the burning of fossil fuels, such as the emission of greenhouse gases and the consequent global warming, society is embarking on a search for alternative energy sources that are less harmful to the environment, with emphasis on energy from biomass. Among these, we can mention biodiesel, a biofuel capable of replacing petroleum diesel, which is produced from vegetable oils and animal fats through a transesterification process. Despite well-established production from oilseed plants, especially soybeans, a more sustainable production of this biofuel is desirable, which does not compromise large areas for cultivation. In addition to this fact, tons of food waste are produced in the world every day, and the final destination of such waste can become problematic, both from an environmental, economic and social point of view. Therefore, there is a growing search for the reuse of residual oils and fats for the production of biodiesel, with emphasis on used frying oil, as well as oil from the fish industry and poultry fat, in addition to the use of residues in catalysis processes. This study seeks, through a bibliographic review, to clarify the use of residual raw material for the production of second-generation biodiesel, as well as the use of alternative residual material in catalytic processes. As shown, oil and fat residues present excellent results, which accredit them as efficient alternative sources for the production of biodiesel compared to oilseeds, making the process more sustainable.

Keywords: Biodiesel; Residual oil; 2G Biofuel; Food waste; Bioenergy.

Resumen

Debido a los problemas relacionados con la quema de combustibles fósiles, como la emisión de gases de efecto invernadero y el consiguiente calentamiento del planeta, la sociedad busca fuentes alternativas de energía que dañen menos el medio ambiente, con énfasis en la energía procedente de biomasa. Entre ellos, podemos mencionar el biodiesel, un biocombustible capaz de sustituir al diésel de petróleo, que se produce a partir de aceites vegetales y grasas animales mediante un proceso de transesterificación. Apesar de la producción bien establecida de plantas oleaginosas, especialmente de soja, es deseable una producción más sostenible de este biocombustible, que no comprometa grandes superficies de cultivo. Combinado con este hecho, diariamente se producen toneladas de residuos de alimentos en todo el mundo, y el destino final de dichos residuos puede resultar problemático, tanto desde el punto de vista medioambiental como económico y social. Así, existe una creciente búsqueda de la reutilización de aceites y grasas residuales para la producción de biodiesel, con énfasis en el aceite usado de freír, así como aceite procedente de la industria pesquera y grasa de ave, además del aprovechamiento de residuos en procesos de catálisis. . El presente estudio busca, a través de una revisión de la literatura, esclarecer el uso de materia prima residual para la producción de biodiesel de segunda generación, así como el uso de material residual alternativo en procesos catalíticos. Tal como se presenta, los aceites y grasas usados presentan excelentes resultados, lo que los acredita como fuentes alternativas eficientes para la producción de biodiesel frente a las oleaginosas, haciendo el proceso más sustentable.

Palabras clave: Biodiesel, Aceite usado; biocombustible 2G; Desperdicio de alimentos; Bioenergía.

INTRODUÇÃO

A demanda mundial por energia vem crescendo significativamente a cada ano, transformando-se em um grande desafio para a sociedade atual. Além do crescimento populacional, o iminente esgotamento das fontes fósseis, como o petróleo, acelera a busca por novas fontes energéticas (Lôbo *et al*, 2009). Além disso, os impactos ambientais causados pelo uso de combustíveis fósseis evidenciam a necessidade de uma produção mais racional de energia.

Desde a Revolução Industrial o planeta Terra vem experimentando um aquecimento acima do normal. Nos últimos tempos, esse aquecimento tem sido de cerca de 0,2 °C a cada década. A meta firmada em 2015 no Acordo de Paris, de manter o aquecimento do planeta em no máximo 1,5 °C até 2100, torna-se bastante difícil de ser alcançada. Pesquisadores afirmam que o planeta pode atingir uma média de temperatura 2 °C acima da média já entre 2041 e 2044, causando um verdadeiro caos climático (IPCC, 2023).

O uso de matérias primas renováveis na obtenção de energia torna-se crucial para a minimização de tais impactos, sendo essencial para um desenvolvimento sustentável de nossa sociedade. Fontes alternativas de energia como solar, eólica, hidrelétrica, maremotriz, biomassa, dentre outras surgem como a principal arma no combate a emissão de GEE (gases do efeito estufa) para a atmosfera devido a queima de combustíveis derivados do petróleo. Os biocombustíveis, produzidos a partir da biomassa, tornam-se grandes aliados nessa busca (IPCC, 2023).

Dentre os biocombustíveis destaca-se o biodiesel, que é "um combustível composto por alquil ésteres de ácidos graxos produzidos através do processo de transesterificação de óleos e gorduras. Comparado ao diesel de petróleo, apresenta a vantagem de não ser tóxico, além da melhor qualidade de suas emissões" (ANP, 2012). Sua produção acontece a parti r de moléculas denominadas triglicerídeos, em um reação chamada de transesterificação. Neste processo, os triglicerídeos reagem com um álcool, geralmente o metanol, na presença de um catalisador ácido, básico ou enzimático. A reação fornece uma mistura de ésteres (o biodiesel) além de glicerol como co-produto do processo (Knothe *et al,* 2006).

De acordo com as fontes e o modo de produção, os biocombustíveis são divididos em 4 gerações (1G, 2G, 3G e 4G). Biodiesel de primeira geração (1G) é derivado de matérias primas alimentícias, tal como soja, canola, e outras oleaginosas (da Silva *et al*, 2021). Biodiesel 2G utilizam resíduos agrícolas e industriais, tal como o óleo de fritura. O biodiesel 3G é originado de biomassa obtida a partir do cultivo de algas e microalgas (Mota e Monteiro, 2013). Já os biocombustíveis 4G produzem biomassa através da captura, armazenamento e conversão do CO_2 em energia (Silva *et al*, 2021).

A maior parte do biodiesel produzido no mundo é de primeira geração, e apesar de ser uma fonte de energia com menores emissões e menos poluente, o uso de grandes áreas para o cultivo de oleaginosas gera algumas controvérsias (Rodrigues e Mistura, 2022). Assim, a busca por fontes de matéria prima menos impactantes tem sido fundamental.

O uso de rejeitos, como gordura residual animal e óleo de fritura usado tem se mostrado vantajosos tanto ambientalmente quanto economicamente. O descarte incorreto destes resíduos gera grande impacto no meio ambiente, devido à grande carga poluidora deles (Rodrigues e Mistura, 2022).

Embora represente uma quantidade muito pequena dos resíduos gerados, o óleo de fritura usado representa um impacto ambiental muito grande (ECÓLEO, 2023). Um litro de óleo tem a capacidade de poluir um milhão de litros de água, equivalente ao consumo de uma pessoa em aproximadamente 14 anos de vida (Huettel, 2022). Os danos ao meio ambiente podem se tornar irreversíveis, a depender da extensão da contaminação. O óleo impede a respiração das plantas e dificulta a absorção de nutrientes, criando uma barreira para a luz solar tanto para a fauna quanto para a flora local, e atingindo a água torna-se tóxico para peixes e outras espécies (Benevides *et al*, 2018).

Além do óleo de fritura usado, gorduras animais como o sebo bovino e gordura de aves, e óleo proveniente do processamento de pescados apresentam-se como excelentes matérias primas na obtenção do biodiesel (Rodrigues e Mistura, 2022).

Dessa forma, o intuito deste trabalho foi descrever e analisar, a partir de uma revisão da literatura no período compreendido entre 2020 e 2024, a utilização de resíduos agrícolas e industriais como matéria prima para a produção de biodiesel.

METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido a partir de uma revisão da literatura, com base em uma pesquisa criteriosa a fim de obter informações relacionadas a produção de biodiesel a partir da reciclagem de matéria prima e/ou catalisadores. Para a execução do trabalho utilizou-se os seguintes banco de dados: Web of Science, Scielo e Scopus, visando trabalhos publicados nos idiomas português, espanhol e inglês, no período compreendido entre 2020 e 2024.

Foram utilizados os seguintes descritores: "biodiesel", "óleo de fritura", "óleo de cozinha residual", "óleo de peixe", "óleo de peixe residual", "resíduos agropecuários, bem como seus correspondentes em inglês ("biodiesel", "frying oil", "waste cooking oil", "fish oil", "waste fish oil", agricultural waste")". Para otimizar a busca pelos bancos de dados foi utilizada também a técnica de truncagem, que corresponde na combinação dos descritores através da palavra AND,

onde os descritores foram combinados 2 a 2 (por exemplo, "biodiesel" AND "waste cooking oil") a fim de tornar a busca mais precisa.

Do total de estudos encontrados, a seleção aconteceu segundo alguns critérios de elegibilidade, que incluíram trabalhos produzidos nos idiomas português, espanhol e inglês, artigos indexados e originais publicados em revistas científicas, avaliados por pares cegos, no período entre 2020 e 2024. Para saber se os trabalhos aprovados deveriam ou não ser incluídos, foi adotado o seguinte procedimento:

1. Conferiu-se se o resumo possui informações importantes referentes a produção de biodiesel a partir de matérias prima ou catalisadores residuais.

2. Quando o resumo não forneceu informações suficientes, foram analisadas as conclusões.

3. Não sendo suficiente, foi lido o trabalho completo.

4. Por fim, os trabalhos selecionados foram estudados integralmente para a confecção deste trabalho.

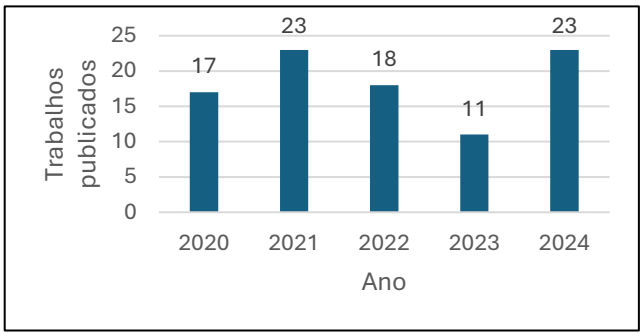
Pós seleção, o material escolhido compreendeu um total de 92 artigos científicos, que foram estudados integralmente para a confecção deste trabalho.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Seleção dos Artigos

Durante a pesquisa bibliográfica, foram encontrados inúmeros resultados nas bases de dados a partir dos descritores pesquisados, totalizando 1160 resultados. Os trabalhos que atenderam os critérios de elegibilidade, excluindo-se as duplicidades e revisões de literatura, totalizaram 92, que foram integralmente estudados para a confecção deste trabalho, sendo a maior parte publicada nos anos de 2021 e 2024, de acordo com o gráfico da figura 1 abaixo.

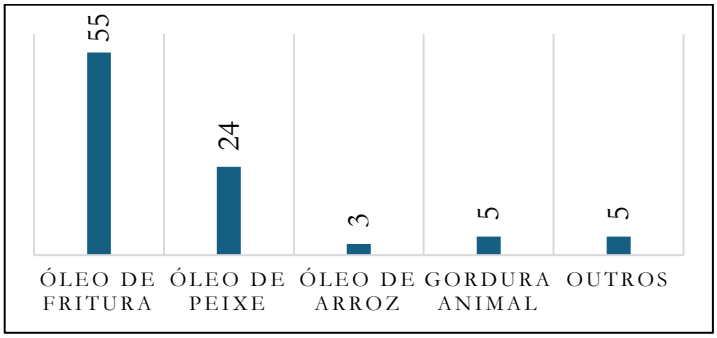
Figura 1. Gráfico com os trabalhos publicados no período compreendido entre 2020 e 2024



Fonte: autoria própria.

Quanto às matérias primas estudadas, o óleo de fritura residual é a mais utilizada, seguida pelo óleo de resíduos de peixe e de gordura animal (sebo bovino e gordura de aves). Também foram encontrados estudos relacionados à cultura de arroz, além de matérias primas alternativas, como lodo de esgoto e borra de café. Além das matérias primas apresentadas, alguns estudos publicaram o uso de resíduos no processo de catálise, com destaque para a casca do ovo, rica em óxido de cálcio (CaO), um óxido que possui caráter básico, portanto atuando como um catalisador básico durante o processo de transesterificação. Um gráfico apresentando as matérias primas utilizadas encontra-se na figura 2.

Figura 2. Gráfico com as matérias primas utilizadas nos trabalhos avaliados



Fonte: autoria própria.

DESENVOLVIMENTO

Óleo de Cozinha Residual (óleo de fritura)

O óleo de fritura, quando descartado incorretamente, resulta em diversos problemas para a sociedade e para o meio ambiente, como entupimento de canos e dificuldade no escoamento de esgoto, além da contaminação de recursos naturais, problemas já elencados anteriormente. Diante disso, a logística reversa dos resíduos de óleo de cozinha torna-se uma excelente opção para minimizar os problemas causados por seu descarte (Oliveira et al, 2022).

Santos e Oliveira (2022) apresentaram um estudo avaliando a logística reversa do óleo residual na cidade de Teresina, PI. O estudo evidenciou a minimização do impacto ambiental devido o descarte inadequado do óleo usado, além de benefícios sociais com a geração de renda extra para a população, além de ganhos econômicos pela redução de custos para adquirir matéria prima. O estudo ainda apontou que com a logística reversa de óleo de cozinha residual há significativa redução de custos na manutenção de redes de esgoto, visto que este resíduo pode ficar incrustrado em tubulações. A principal problemática apontada pelos autores é relacionada à

conscientização da população, pois a falta do hábito de reciclar dificulta a operação da logística reversa.

Morais *et al* (2024) apresentaram um estudo de caso envolvendo a parceria entre uma empresa de reciclagem e outra do ramo alimentício no estado de São Paulo. O estudo evidencia ganhos ambientais, sociais e econômicos, e chama a atenção para a conscientização da população.

Apesar de ser originário de óleos vegetais, como soja, que já são utilizados na produção do biodiesel, o óleo de fritura possui algumas particularidades. Durante o processo de fritura, reações provocam mudanças químicas na estrutura do óleo. Ácidos graxos livres (AGL) são formados devido a reações de hidrólise (catalisadas pelo calor e umidade), além da formação de compostos orgânicos indesejáveis, como peróxidos, dienos e cetonas, dentre outros, formados pela oxidação do material lipídico durante o processo de fritura. A presença desses compostos aumenta a suscetibilidade do biodiesel a sofrer degradação, o que diminui sua eficiência no processo de combustão (Freire *et al*, 2013).

Liu *et al* (2021) publicaram um estudo apresentando a viabilidade econômica para produção de biodiesel a partir do óleo de fritura. Segundo os autores, o pré-tratamento necessário ao óleo residual para submetê-lo ao processo de transesterificação pode ser relativamente caro, respondendo por aproximadamente 15% do custo total. A implementação de políticas no gerenciamento destes resíduos, bem como desenvolvimento de tecnologias de reciclagem são fundamentais para tornar o biodiesel de óleo de fritura mais competitivo economicamente.

Silva e Fonseca (2021) estudaram a utilização de refino físico em substituição ao refino químico (utilizando NaOH e H_3PO_4) de óleo reciclado no processo de produção de biodiesel, a fim de minimizar as desvantagens deste último. Para o tratamento físico, o óleo reciclado foi deixado sob agitação e evaporação (a 200°C) por 2 horas. Este tratamento reduziu a acidez em 32,59% (enquanto o químico reduz em 92,11%), o que pode ser justificado pela formação de ácidos graxos livres durante o tratamento físico. Quanto ao rendimento, o tratamento físico apresentou-se mais vantajoso, com aumento de 51,09% em relação ao químico, com diminuição da formação de resíduos. O estudo concluiu que a técnica pode ser muito rentável para a indústria, mas é preciso ajustar o processo de tratamento para uma diminuição eficaz do índice de acidez da matéria prima.

Silva *et al* (2021) estudaram a produção de bioadsorventes a base de resíduos agrícolas (bagaço de cana e cascas de frutas: coco, banana e abacaxi). O objetivo era de retirar os ácidos graxos livres do óleo residual, reduzindo o índice de acidez do biodiesel produzido. A síntese obteve um rendimento de 95%, com significativa redução da acidez do biodiesel produzido quando comparado ao óleo não lubrificado.

Costa *et al* (2020) utilizaram o óleo residual como matéria prima a partir do processo de hidroesterificação (onde tem-se a hidrólise dos ácidos graxos e, em uma segunda etapa, esses AGL são esterificados), a partir de processo catalítico enzimático (com lipase). A reação apresentou rendimento de 98%. O grupo possui outro estudo onde contorna os problemas encontrados nos estudos anteriores através da catálise enzimática, utilizando a enzima lipase (Costa *et al*, 2020). Gong *et al* (2020) apresentaram um estudo de otimização da catálise enzimática para produzir biodiesel a partir do óleo de fritura, e os resultados obtidos foram bastante satisfatórios.

Rosa *et al* (2020) publicaram estudo comparando o processo de transesterificação do óleo de soja antes e após sua utilização em frituras. Os resultados obtidos pelos autores mostraram que o biodiesel produzido tanto pelo óleo de soja cru quanto pelo óleo residual está de acordo com as normas da ANP para caracterização do biodiesel, apesar do óleo de soja cru ter apresentado um rendimento superior ao óleo residual. A justificativa, segundo os autores, está no fato do óleo residual conter impurezas como resíduos de alimentos e umidade, enquanto o óleo de soja cru apresenta-se mais puro, proporcionando assim maior conversão dos triglicerídeos em biodiesel, o que evidencia a necessidade de uma etapa de pré-tratamento do óleo residual.

Coelho *et al* (2020) estudaram a produção de biodiesel a partir da transesterificação do óleo residual com etanol, demonstrando a viabilidade da síntese. Em outro trabalho, o mesmo grupo apresentou uma comparação entre o biodiesel produzido a partir do óleo residual e do sebo bovino, concluindo que este último não apresentou uma boa separação de fases entre o biodiesel e o glicerol formado. Segundo os autores, o uso do etanol no lugar do metanol pode ter contribuído para o ocorrido (Coelho *et al*, 2020). Levandoski *et al* (2022) também produziram biodiesel a partir do óleo residual e do sebo bovino, obtendo rendimentos variando entre 58,5 e 84%.

Outilli *et al* (2020) produziram biodiesel a partir do óleo residual de restaurantes universitários na Argélia, avaliando o processo quanto a eficiência de carbono, economia de átomos e eficiência da reação, princípios da química verde que, segundo os autores, foram atendidos no estudo. Foteinis *et al* (2020) avaliaram a sustentabilidade do biodiesel produzido a partir do óleo de cozinha usado. Os autores apresentaram dados que mostram uma redução significativa de impactos ambientais quando comparado ao diesel mineral. A pegada de carbono (14g de CO2eq/MJ) foi cerca de 40% menor quando comparada ao biodiesel de primeira geração.

Janbarari (2020) mostrou em seu estudo eficiência na conversão do óleo de fritura em biodiesel, a partir da catálise básica, processo catalítico mais utilizado na produção de biodiesel. A catálise básica também foi utilizada por Ravaglia *et al* (2023), que propuseram um projeto de uma miniusina piloto para produção de biodiesel. Bajwa *et al* (2024) obtiveram biodiesel a partir da mistura de óleo residual com óleo de gergelim (70:30). O processo teve rendimento de 94%.

Innocenzi e Prisciandaro (2021) compararam a produção de biodiesel a partir do óleo virgem e do óleo residual, concluindo que a produção a partir de óleo residual apresentou-se economicamente mais viável. Suzihaque *et al* (2022) também estudaram a produção a partir de óleo residual por catálise básica, com rendimento superior a 90%, e atendendo as especificações ASTM D6751 e EN14214. Ulakpa *et al* (2022) obtiveram rendimento de 91,2% utilizando um catalisador básico (NaOH) impregnado em argila. Khershavani *et al* (2023) utilizaram a catálise básica com CaO, e o rendimento do processo foi de 92,26%.

Já Sivarethinamohan *et al.* (2022) utilizaram um reator mantido com energia solar, por catálise básica. O reator personalizado era um tubo de cobre coberto com uma tinta preta, para capturar energia do sol em forma de calor. A matéria prima, metanol e o catalisador foram mantidos no reator. O rendimento da reação foi de 82%. Niyas e Shaija (2023) utilizaram um reator de fluxo alimentado por energia solar, e obtiveram rendimento de 93,97%.

Outro resíduo estudado foi o óleo de pequi. Oliveira *et al* (2020) avaliaram o tempo de fritura o qual o óleo foi submetido, e observaram que o aumento do tempo de cocção do óleo a altas temperaturas levou a uma perda da qualidade do biodiesel produzido. Quando comparado ao óleo de pequi in natura, o biodiesel produzido a partir do óleo residual apresentou uma perda na estabilidade. Segundo os autores, a menor presença de AGL e a maior presença de antioxidantes justificam o melhor desempenho do óleo de pequi in natura.

Apesar dos bons resultados obtidos nos estudos citados acima, a busca por catalisadores que tornem o processo mais sustentável, aumentando o rendimento e agredindo menos o meio ambiente, tem sido bastante explorada. Neste sentido, dominam os estudos baseados nos catalisadores heterogêneos ricos em CaO, um óxido básico encontrado em grande quantidade na casca de ovo de galinha.

A casca de ovo, rica em carbonato de cálcio ($CaCO_3$), é calcinada a uma temperatura aproximada de 800°C, formando CaO (óxido de cálcio), um catalisador básico heterogêneo que apresenta vantagens como longa vida útil no processo de catálise e reação com o glicerol lixiviando-o durante o processo de transesterificação, obtido de acordo com a reação abaixo:

$$CaCO_3 \xrightarrow[\text{(aquecimento)}]{} CaO + CO_2 \qquad \text{Equação 1}$$

Alguns autores obtiveram excelentes resultados com o uso da casca de ovo como catalisador. Nadeem *et al* (2021) utilizaram o CaO derivado da casca do ovo para transesterificação do óleo de cozinha residual. O catalisador mostrou-se bastante eficiente, com rendimento de 86% do processo.

Acredita-se que metais e óxidos metálicos estabilizem catalisadores heterogêneos no processo de transesterificação, auxiliando na esterificação de AGL, formando catalisadores bifuncionais (Falowo *et al*, 2024). Tal procedimento pode ser importante na redução de custos do processo, pois elimina a etapa de pré-tratamento da matéria prima (seja físico, seja através de esterificação dos AGL).

Falowo *et al* (2024) prepararam um catalisador de casca de ovo e sulfato férrico, onde este atuou na esterificação dos AGL enquanto o CaO foi responsável pelo processo catalítico. Kamaronzamam *et al* (2020), que utilizaram a casca de ovo dopada com níquel no processo de transesterificação do óleo usado. O uso do catalisador proposto levou a reação a rendimento aproximado de 100%, contribuindo para a redução dos custos de produção. Anteriormente, o grupo já havia obtido excelentes resultados com o uso da casca de ovo calcinada sem adição de níquel (Kamaronzamam *et al,* 2020).

Sharma *et al* (2022) prepararam um catalisador da casca do ovo e óxido de cobre. O grupo submeteu o óleo usado a um processo de esterificação (a fim de eliminar AGL e a acidez da matéria prima) e realizou o processo de transesterificação com metanol, etanol e isopropanol, tendo este último apresentado o melhor resultado.

Putra *et al* (2020) utilizaram argila extraída de turfa como suporte para o CaO obtido da casca do ovo, o que contribuiu para o aumento do rendimento da reação. De acordo com os autores, a sílica contribui para a formação de ésteres (atuando nos AGL), enquanto o CaO catalisa a reação. Mohadesi *et al* (2022) também utilizaram a argila como suporte para o CaO, com rendimento de 97,16% para o processo.

Hvidsten e Marchetti (2023) prepararam um catalisador bifuncional de CaO e glicerol. O glicerol é um subproduto da reação de transesterificação, então sua geração durante o processo leva a ativação do CaO, o que contribui para uma melhora do rendimento da reação. Attari *et al* (2022) utilizaram o CaO derivado da casca de ovo em um processo catalítico assistido por ultrassom, obtendo alto rendimento, em torno de 98%.

Além da casca de ovo, o CaO pode ser obtido a partir de outros materiais residuais. Gouran *et al* (2021) obtiveram CaO a partir de cinzas de farelo de trigo. Mohammed *et al* (2023) obtiveram CaO a partir de cascas de caracol, através de calcinação, processo semelhante ao realizado com as cascas de ovo. Furtado *et al* (2024) impregnaram CaO em cascas de arroz, porém o estudo não conseguiu bons resultados, pois não conseguiram esterificar os AGL do óleo de fritura. Khan *et al* (2020) obtiveram CaO a partir da calcinação de resíduos de ossos de avestruz.

Além da eficiência dos catalisadores a base de CaO, os estudos mostraram que ele apresenta bom potencial (sem diminuição do rendimento do processo de transesterificação) mesmo após a

reutilização, podendo ser reutilizados por até quatro vezes. Os estudos também evidenciam a importância dos metais no processo de esterificação dos AGL, o que tem levado as pesquisas na busca por catalisadores metálicos.

Jume *et al* (2020) apresentaram um processo de catálise heterogênea utilizando um catalisador de óxido de grafeno dopado com nanopartículas metálicas de zircônio e estrôncio, obtendo resultados promissores na produção de biodiesel. Segundo os autores, a nanocatálise apresentou vantagens como baixo custo, alta eficiência na conversão dos triglicerídeos, além da possibilidade de reutilização (o que minimiza a geração de resíduos durante o processo).

Al-Mutahseb *et al* (2020) avaliaram a produção de biodiesel a partir de óleo de cozinha residual catalisada pelos metais $Zn/MgO/ZrO_2$. O estudo obteve rendimento de 92,3% de biodiesel, e o catalisador pode ser reutilizado com eficiência bastante próxima ao catalisador 'fresco'. Ramme *et al* (2021) produziram um catalisador químico-enzimático a base de lipase com os metais Ca, Cu, Zn, Ni e Mg, formando um catalisador híbrido, que reduziu significativamente a acidez da matéria prima.

Abo El-Khair *et al* (2024) estudaram a transesterificação de óleo de cozinha usado através de um processo catalítico com KOH carregado em aluminato de sódio ($KOH/ZnAl_2O_4$). Para produção do catalisador, foram utilizados resíduos de papel alumínio como precursor. Obteve rendimento de 95,3%. Já Parandi *et al* (2022) estudaram a transesterificação de óleo de cozinha usado com um nanocatalisador heterogêneo (enzima lipase imobilizada em um nanocompósito magnético híbrido de Fe_3O_4 e SiO_2).

Outro catalisador bifuncional foi desenvolvido por Liu *et al* (2024), a base de óxido de Sr-Zn. Guo *et al* (2022) desenvolveram catalisadores com os óxidos de cobre e zinco. Já Da Silva *et al* (2023) desenvolveram um catalisador de trióxido de molibdênio. John *et al* (2023) catalisaram a reação de transesterificação com óxido de ferro nanoparticulado. Estes trabalhos apresentaram excelentes resultados, corroborando pesquisas anteriores, em que metais e óxidos metálicos apresentam-se como excelente alternativa como catalisadores.

Óleo Residual de Peixe

Após o processamento, cerca de 50 a 90% do pescado é utilizado para fins alimentícios, enquanto cauda, cabeça, barbatanas e vísceras são descartadas como resíduos. Composto por até 65% de óleo, esse resíduo torna-se uma matéria prima em potencial para a produção de biodiesel (Cardoso *et al*, 2019). Dessa forma, surge como um objeto de pesquisas em todo mundo.

Velasquez *et al* (2020) otimizaram a produção de biodiesel a partir de óleos de resíduo de peixe através de catálise enzimática. Apesar da maioria dos parâmetros estar em conformidade com

os estabelecidos pela norma ASTMD6751, o biodiesel produzido apresentou um valor de acidez superior ao limite estabelecido. Segundo os autores, tal ocorrência deve-se à presença de água na matéria prima. Uma solução apontada pelos autores foi a secagem do óleo antes do processo e adicionar peneiras moleculares durante a reação. O aumento da acidez também pode ter ocorrido durante o processo de extração do óleo, principalmente se for feita com água a altas temperaturas. Uma possível solução seria a extração por solventes reduzindo a possibilidade de hidrólise do óleo. Por fim, não se pode descartar a presença de ácidos graxos poliinsaturados no óleo residual de peixe (em torno de 20,5%), que levam a formação de AGL durante o processo de transesterificação. Segundo os autores, o pré-tratamento da matéria prima com esterificação ácida pode reduzir a acidez do biodiesel produzido.

Oliveira *et al* (2022) obtiveram biodiesel a partir do óleo de tainha. A extração do óleo foi realizada com heptano (extração líquido-líquido) a partir das vísceras dos peixes (reduzindo a quantidade de água e consequentemente a acidez), e gliceróxido de sódio foi utilizado como catalisador. Balraj *et al* (2024) utilizaram um nanocatalisador de ZnO para transesterificação de óleo de peixe, com rendimento de 91,54%.

Valentini *et al* (2021) apresentaram como desvantagem do óleo de peixe como matéria prima a sua estabilidade oxidativa, principalmente devido a presença de insaturações na cadeia carbônica. Para contornar essa limitação, o grupo misturou óleo de coco não comestível ao óleo de peixe antes da transesterificação, catalisada por KOH, e concluiu que houve influência positiva na obtenção do biodiesel, pois o fato de ser constituído majoritariamente por ácidos graxos saturados diminui a oxidação.

Nayak *et al* (2021) avaliaram o desempenho do biodiesel produzido a partir da mistura entre óleo de peixe e óleo de cozinha residual quanto a desempenho, combustão e emissão. O estudo mostrou desempenho semelhante ao do diesel fóssil, com emissões de CO, hidrocarboneto e fumaça diminuídas, porém com aumento na emissão de NO. O estudo sugere que a mistura tem alto potencial para evitar problemas atuais, obtendo um combustível mais sustentável.

Dharmegowda *et al* (2022) concentraram-se em resíduos de óleo de coco e peixe como matéria prima, empregando um nanocatalisador de MgO. O catalisador nanoparticulado apresentou a vantagem de ser utilizado em pequena quantidade (2% em peso). Isso porque a área superficial tem um aumento significativo em materiais nanoparticulados, levando a uma melhor atuação do catalisador, consequentemente a uma conversão máxima dos óleos em biodiesel. O nanocatalisador pode ser reutilizado por até 5 ciclos, sem perdas significativas no rendimento da reação.

Outros trabalhos utilizaram resíduos de pescados para extração de óleo para produção de biodiesel obtendo excelentes resultados, tais como Vasconcelos *et al* (2023) com 99% de rendimento, Kiehbadroudinezhad *et al* (2023), e Sathiyamoorthi *et al* (2024).

Alguns autores utilizaram resíduos de peixe como catalisadores para o processo de transesterificação. Mohamed *et al* (2024) obtiveram o biodiesel utilizando óleo de salmão como matéria prima, enquanto Mohebolkhames *et al* (2024) utilizaram resíduos de espinha de salmão como suporte para KOH, produzindo um catalisador para a transesterificação de óleo de girassol. Patchimpet *et al* (2020) utilizaram a lipase obtida das vísceras de tilápia como catalisador para óleo de fritura. Já Moraes *et al* (2021) utilizaram a tilápia do Nilo como matéria prima. Pham et al (2022) obtiveram biodiesel a partir do óleo de bagre.

Karkal *et al* (2023) utilizaram óleo de farinha de peixe marinho como matéria prima e cascas de carangueijo como fonte para um catalisador heterogêneo (composto predominantemente por CaO, após a calcinação). O estudo para reutilização do catalisador mostrou bom potencial para ser reutilizado por até 4 vezes.

A tabela 1 apresenta outros trabalhos que utilizaram resíduos de peixe como matéria prima para extração de óleos.

Tabela 1. Matéria prima a base de peixe e catalisadores para produção de biodiesel

Autores	Ano	Matéria prima	Catalisador
Venkatesan et al	2021	Sardinha	KOH
Agu et al	2024	Óleo de peixe	Espinha de peixe
Brindhadevi et al	2024	Óleo de peixe	TiO_2/SiO_2
Shathishi et al	2024	Óleo de peixe	ZnO/grafeno
Golmakani et al	2024	Truta	base/microondas
Shalfoh et al	2024	Óleo de peixe	Base/ CO_2 supercrítico

Fonte: Autoria própria.

Outros Resíduos Agropecuários

Além do óleo de fritura e do óleo de resíduos de peixe, outros resíduos agrícolas e alimentares tem sido objeto de estudo. Quanto à matéria prima, resíduos ricos em óleos e gorduras são amplamente estudados, em relação à catálise deu-se preferência ao desenvolvimento de catalisadores heterogêneos.

Estudos bastante interessantes foram desenvolvidos na Universidade de Pelotas, no Rio Grande do Sul, Brasil. O farelo de grãos do processamento do arroz foi a matéria prima estudada, de onde foram extraídos óleos para a produção de biodiesel. O grupo publicou três trabalhos, listados a seguir:

- Generation of biodiesel and glycerol from waste of rice industries in Brazil: estudo produziu biodiesel a partir de resíduos da indústria do processamento de arroz por catálise básica, obtendo um produto que atende as especificações das normas vigentes (Nadaleti *et al*, 2021).
- Investigation of ethyl biodiesel via transesterification of rice bran oil: bioenergy from residual biomass in Pelotas, Rio Grande do Sul – Brazil: objetivo foi produzir biodiesel a partir dos resíduos do processamento do arroz por meio de catálise básica. O estudo buscou utilizar o etanol durante o processo, um álcool menos tóxico que o metanol e produzido em larga escala no Brasil. De acordo com os autores, o biodiesel produzido atende as especificações regulamentares das normas ASTM, e o processo mostrou-se viável tanto técnica quanto economicamente (Lourenço *et al*, 2021).
- Production potential of biodiesel, methane and electricity in the largest steamed rice industry in Rio Grande do Sul, Brazil: case study: estudo utilizou as cascas do processamento do arroz para a produção de biodiesel, além do efluente da mesma para produção de biometano. Segundo os autores, a indústria de processamento do arroz no RS tem um potencial de produção de 102 m^3/dia de biodiesel e 2930 m^3/dia de metano, podendo gerar até 18900 Kwh/dia de eletricidade (Nadaleti *et al*, 2021).

A gordura animal, sobretudo de aves, tem despertado bastante interesse de pesquisadores. Os resíduos de abate de aves correspondem a 30% do peso do animal, presentes principalmente na pele, rica em gordura. Ashouri *et al* (2024) extraíram o óleo residual de moela de frango e produziram biodiesel por catálise básica.

Marciniuk *et al* (2021) desenvolveram metodologia para produção de biodiesel a partir de óleo extraído de vísceras, carcaça e pele de frango via catálise básica. O material foi aquecido até a fervura, e a parte sólida foi filtrada e descartada. O líquido foi mantido em estufa com temperatura controlada e após 24 horas era visível a divisão de fases, onde foi possível separar o óleo utilizado para a transesterificação.

Silva *et al* (2022) produziram biodiesel a partir de óleo residual de cozimento de frango e pato. Para obtenção da matéria prima, coxas das asas de frango e pato foram assadas em forno convencional, e a gordura fundida foi separada. O catalisador utilizado foi o gliceróxido de sódio, pois como os óleos mostraram baixa acidez, permitiram a catálise alcalina. O produto obtido apresentou teor de ésteres, massa específica (20°C) e viscosidade cinemática (40°C) que atendem as normas de biodiesel.

Resíduos de café também se mostram promissores na produção de biodiesel. Annal *et al* (2024) utilizaram a borra de café como matéria prima, submetendo-a a extração por soxhlet para extração dos lipídios. A transesterificação ocorreu mediante catálise básica, e os resultados mostram que essa pode ser uma excelente alternativa na produção do biodiesel.

Castillo *et al* (2022) estudaram a produção de biodiesel a partir de resíduos oleosos de uma indústria pasteurizadora de leite, através de catálise básica com NaOH e catálise heterogênea com hidróxido duplo lamelar (HDL): uma argila aniônica foi utilizada. HDL são encontrados na natureza principalmente em rochas metamórficas. O biodiesel foi obtido com alto rendimento (97,5 e 98,5%) para as reações homogênea e heterogênea, respectivamente, cumprindo os principais parâmetros estabelecidos pela norma EN 14214.

Patiño *et al* (2024) obtiveram o biodiesel a partir da transesterificação de material graxo presente no lodo de esgoto. Após extração, os lipídeos foram submetidos a transesterificação com catalisadores heterogêneos a base de fósforo, tungstênio e silício. O estudo mostrou que, além de excelente matéria prima na produção de biogás, o lodo de esgoto surge como uma alternativa para produção de biodiesel, podendo ser explorado por ambos os campos.

Catalisadores Alternativos

Nascimento *et al* (2021) produziram biodiesel a partir de óleo de fritura utilizando lama vermelha como catalisador. A lama vermelha é rica em óxidos metálicos, como ferro, alumínio, sílica, sódio, cálcio e titânio. Após secagem a lama foi submetida à circulação de ar a temperatura de 100°C. Oliveira *et al* (2021) utilizaram resíduos de casca de tangerina como catalisador, que apresentou como principal vantagem sua reutilização sem perdas significativas no rendimento por até 4 ciclos. Mawlid *et al* (2024) abordaram a utilização de catalisadores derivados de resíduos vegetais para conversão do óleo de cozinha residual. Foi obtido hidrocarvão a partir da carbonização hidrotérmica da casca de laranja, que foi utilizado para preparar um catalisador heterogêneo carbonato de potássio/hidrocarvão. A conversão de óleo em biodiesel foi de 89,2%. Para ser reutilizado, o catalisador precisa ser embebido em carbonato de potássio para ser regenerado. O grupo já havia proposto um avaliaram um catalisador heterogêneo magnético composto de $SrO/MgFe_2O_4$ (Mawlid *et al*, 2022).

Santos *et al* (2022) trataram o pó de mármore a temperatura de 900°C, obtendo CaO que foi utilizado como catalisador para obtenção de biodiesel de óleo de soja. Eldiehy *et al* (2022) obtiveram catalisador a partir de folhas de batata doce, ricas em óxidos e carbonatos, principalmente de potássio.

A busca por catalisadores alternativos é importante, pois torna o processo de transesterificação mais sustentável. A utilização de resíduos tanto como matéria prima quanto como catalisadores minimiza problemas com a gestão destes resíduos, além de tornar a produção de biodiesel um processo mais verde.

A tabela 2 apresenta outros trabalhos relacionados à reciclagem produtos para obtenção de matéria prima e catalisadores para o processo de transesterificação.

Tabela 2. Resíduos reciclados para a produção de biodiesel como matéria prima e/ou catalisador

Autores	Ano	Matéria prima	Catalisador
Petrucelli et al	2021	óleo de fritura	NaOH
De Oliveira e De Andrade	2021	óleo de fritura	KOH
Naeem et al	2021	óleo de fritura	Carvão ativado e espiga de milho
Kumar et al	2021	óleo de fritura	Casca de ovo
Jayaseelan et al	2021	gordura animal	KOH
Aghel et al	2022	óleo de fritura	MgO/grafeno
Ramirez et al	2023	óleo de fritura	Casca de ovo
Wei et al	2023	óleo de fritura	Lipase
Osagiede e Aisien	2024	óleo de fritura	Casca de ovo/ cascade semente de borracha
Elsnar et al	2024	azeite de oliva	Polpa de azeitona

Fonte: Autoria Própria.

CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou um panorama das pesquisas voltadas a produção de biodiesel a partir de resíduos como matérias primas alternativas. O óleo de fritura destaca-se como a matéria prima mais estudada, seguida pelo óleo de resíduos do processamento de peixe.

A produção de ácidos graxos livres durante o aquecimento do óleo em frituras é a principal limitação desta matéria prima, e desta forma é preciso submetê-la a um pré-tratamento antes da transesterificação. Este pré-tratamento consiste na esterificação dos ácidos graxos livres, seja por processo químico ou físico.

Além do uso em matéria prima, resíduos estão sendo estudados como alternativa em catalisadores heterogêneos, com destaque para a casca do ovo, que após processo de calcinação fornece o CaO, um óxido básico que tem apresentado excelentes resultados nos processos de catálise.

Metais e nanopartículas metálicas vem sendo estudados como catalisadores, principalmente catalisadores bifuncionais. Quando adicionados a uma outra substância (CaO, por exemplo) os metais atuam na esterificação dos ácidos graxos livres, diminuindo significativamente a acidez da matéria prima e do biodiesel obtido.

Outros resíduos têm sido pesquisados com sucesso no processo de produção de biodiesel, seja como matéria prima, seja como catalisador: borra de café, farelo de grãos de arroz, lodo de esgoto, cascas de frutas, lama vermelha, pó de mármore e casca de caranguejo estão entre os citados no trabalho.

O uso de resíduos torna a síntese do biodiesel um processo mais sustentável, principalmente quando resíduos são utilizados em várias etapas da produção, como matéria prima e catalisadores, dando preferência aos catalisadores reutilizáveis. Retirar esses resíduos do meio ambiente é de suma importância na minimização dos impactos causados por eles. Em vista disso, esse artigo apresenta como contribuição a importância da logística reversa do óleo residual e de outros resíduos agropecuários na produção de biodiesel, minimizando os impactos desses resíduos e ao mesmo tempo gerando uma fonte de energia que agride menos o meio ambiente.

AGRADECIMENTOS

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ.

REFERÊNCIAS

ABO ELKHAIR, Muhammad A. *et al.* Rapid and low-temperature biodiesel production from waste cooking oil: Kinetic and thermodynamic insights using a KOH/ZnAl2O4 nanocatalyst derived from waste aluminum foil. *Energy Conversion and Management*, [*s. l.*], v. 318, p. 118898, 2024.

AGHEL, Babak *et al.* Production of biodiesel from high acidity waste cooking oil using nano GO@MgO catalyst in a microreactor. *Renewable Energy*, [*s. l.*], v. 200, p. 294–302, 2022.

AGU, Chinedu M. *et al.* Biodiesel production from waste cat fish oil using heterogeneous catalyst from cat fish born: A viable waste management approach, and ANN modeling of biodiesel yield. *Waste Management Bulletin*, [*s. l.*], v. 1, n. 4, p. 172–181, 2024.

LEVANDOSKI, M. S.; ALFREDO, A.; VEIGA, B.; SOARES, F.; GEREMIAS, R. Estudo da produção de biodiesel a partir de óleo residual de origem animal e vegetal via transestereficação. *Seminário de Iniciação Científica e Seminário Integrado de Ensino, Pesquisa e Extensão (SIEPE), [S. l.]*, p. e31222, 2022.

AL-MUHTASEB, Ala'a H. *et al.* Facile technique towards clean fuel production by upgrading waste ***Science***, [*s. l.*], v. 32, n. 8, p. 3410–3416, 2020.

ANNAL, Umaiyambika Neduvel *et al.* Electrolytic biodiesel production from spent coffee grounds: Optimization through response surface methodology and artificial neural network. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, [*s. l.*], v. 165, p. 105697, 2024.

BRASIL. ANP - Agência Nacional de Petróleo e Biocombustíveis. *Resolução nº 14, de 18 de maio de 2012.* Especificação do Biodiesel.

ASHOURI, Rouhollah *et al.* Valorization of slaughterhouse wastes through transesterification for sustainable biodiesel production using potassium hydroxide as a heterogeneous catalyst. *Journal* of *Cleaner Production*, [*s. l.*], v. 447, p. 141596, 2024.

ATTARI, Arash; ABBASZADEH-MAYVAN, Ahmad; TAGHIZADEH-ALISARAEI, Ahmad. Process optimization of ultrasonic-assisted biodiesel production from waste cooking oil using waste chicken eggshell-derived CaO as a green heterogeneous catalyst. *Biomass and Bioenergy*, [*s. l.*], v. 158, p. 106357, 2022.

BAJWA, Waqar *et al.* Optimization of biodiesel yield from waste cooking oil and sesame oil using RSM and ANN techniques. *Heliyon*, [*s. l.*], v. 10, n. 15, 2024.

BALRAJ, S. *et al.* Modelling and optimization of biodiesel production from waste fish oil using nano immobilized rPichiapastoris whole cell biocatalyst with response surface methodology and hybrid artificial neural network based approach. *Bioresource Technology,* [*s. l.*], v. 393, p. 130012, 2024.

BENEVIDES, W. D. *et al.* Destino dos resíduos de óleo de cozinha dos restaurantes na areia de praias do município de João Pessoa, PB. *In:* CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL E SUSTENTABILIDADE. V. 6, 2018, João Pessoa.

BRINDHADEVI, Kathirvel *et al.* Comparison of photocatalytic vs conventional transesterification for biodiesel preparation from fish waste oil using green TiO2/SiO2 catalyst. *Process Safety and Environmental Protection*, [*s. l.*], v. 188, p. 167–176, 2024.

CARDOSO, L. C. *et al.* Synthesis and optimization of ethyl esters from fish oil waste for biodiesel production. *Renewable Energy*, v. 133, p. 743–748, 2019.

CASTILLO, A.M., Nahum *et al. Producción sustentable de biodiesel empleando grasas residuales de la industria láctea.* [*S. l.: s. n.*], [*s. d.*].

CHING-VELASQUEZ, Jonny *et al.* Production and characterization of biodiesel from oil of fish waste by enzymatic catalysis. *Renewable Energy*, [*s. l.*], v. 153, p. 1346–1354, 2020.

COELHO, Felipe de Luca Lima *et al.* Estudo do processo de produção do Biodiesel obtido a partir de óleo de fritura residual e sebo bovino utilizando a transesterificação etílica básica. *Brazilian Journal of Development,* [*s. l.*], v. 6, n. 5, p. 28836–28843, 2020.

COSTA, Matheus J. *et al.* Enzymatic biodiesel production by hydroesterification using waste cooking oil as feedstock. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, v. 157, p. 108131, 2020.

DHARMEGOWDA, Impha Yalagudige *et al.* MgO Nano-Catalyzed Biodiesel Production from Waste Coconut Oil and Fish Oil Using Response Surface Methodology and Grasshopper Optimization. *Sustainability (Switzerland),* [*s. l.*], v. 14, n. 18, 2022.

ECOLEO – Associação Brasileira para sensibilização, coleta e reciclagem de resíduos de óleo comestível. Disponível em: https://ecoleo.org.br/projetos/6766-2/ Acesso em: 02/02/2024.

ELDIEHY, Khalifa S.H. *et al.* Towards biodiesel sustainability: Waste sweet potato leaves as a green heterogeneous catalyst for biodiesel production using microalgal oil and waste cooking oil. *Industrial Crops and Products*, [*s. l.*], v. 187, p. 115467, 2022.

ELNASR, Tarek A. *et al.* Sustainable biodiesel production from waste olive oil: Utilizing olive pulp-derived catalysts for environmental and economic benefits. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, [*s. l.*], v. 37, p. 101426, 2024.

FALOWO, Olayomi Abiodun *et al.* A bifunctional catalyst from waste eggshells and its application in biodiesel synthesis from waste cooking oil. *Results in Engineering*, [*s. l.*], v. 23, 2024.

FOTEINIS, Spyros *et al.* Used-cooking-oil biodiesel: Life cycle assessment and comparison with first- and third-generation biofuel. *Renewable Energy,* [*s. l.*], v. 153, p. 588–600, 2020.

FREIRE, P. C. M.; MANCINI-FILHO, J.; FERREIRA, T. A. P. DE C. Principais alterações físico-químicas em óleos e gorduras submetidos ao processo de fritura por imersão: regulamentação e efeitos na saúde. *Revista de Nutrição*, v. 26, n. 3, p. 353–358, 1 jun. 2013.

FURTADO, Julia; FERRARI, Nathalia; SOARES Ana. Utilização do catalisador de cao/cca para obtenção de biodiesel a partir do óleo residual de fritura. *Revista Ifes Ciência*, [*s. l.*], v. 10, n. 4, 2024.

GOLMAKANI, Mohammad-Taghi *et al.* Fatty acid methyl ester production from rainbow trout waste oil using microwave-assisted transesterification. Process Biochemistry, [*s. l.*], v. 139, p. 33–43, 2024.

GONG, Haitao *et al.* A new reactor for enzymatic synthesis of biodiesel from waste cooking oil: A static-mixed reactor pilot study. *Renewable Energy,* [*s. l.*], v. 154, p. 270–277, 2020.

GOURAN, Ashkan; AGHEL, Babak; NASIRMANESH, Farzad. Biodiesel production from waste cooking oil using wheat bran ash as a sustainable biomass. *Fuel,* [*s. l.*], v. 295, 2021.

GUO, Mengli *et al.* Highly active and recyclable CuO/ZnO as photocatalyst for transesterification of waste cooking oil to biodiesel and the kinetics. Fuel, [*s. l.*], v. 315, p. 123254, 2022.

HUETTEL, M. Oil pollutions of beaches. *Current Opinion in Chemical Engineering,* Tallahassee, v. 36, p. 1- 10, 2022.

HVIDSTEN, Iver Bergh; MARCHETTI, Jorge Mario. Securing liquid biofuel by upgrading waste fish oil via renewable and sustainable catalytic technology. *Fuel,* [*s. l.*], v. 333, 2023.

INNOCENZI, Valentina; PRISCIANDARO, Marina. Technical feasibility of biodiesel production from virgin oil and waste cooking oil: Comparison between traditional and innovative process based on hydrodynamic cavitation. *Waste Management,* [*s. l.*], v. 122, p. 15–25, 2021.

INTERGOVERNAMENTAL Panel CLimate Change - IPCC, 2023: Summary for Policymakers. Geneva: [*s. n.*]. 182 p.

JANBARARI, Seyed Reza; AHMADIAN BEHROOZ, Hesam. Optimal and robust synthesis of the biodiesel production process using waste cooking oil from different feedstocks. *Energy,* [*s. l.*], v. 198, 2020.

JAYASEELAN, G. Antony Casmir *et al.* Synthesis and performances characteristics of biodiesel from animal fat. *Materials Today: Proceedings.* Elsevier Ltd, 2020. p. 6053–6056.

JOHN, J. G. *et al.* Waste cooking oil biodiesel with FeO nanoparticle – A viable alternative fuel source. *Materials Today: Proceedings,* [*s. l.*], v. 72, p. 1991–1995, 2023.

JUME, Binta Hadi *et al.* Biodiesel production from waste cooking oil using a novel heterogeneous catalyst based on graphene oxide doped metal oxide nanoparticles. *Renewable Energy*, [*s. l.*], v. 162, p. 2182–2189, 2020.

KAMARONZAMAN, Muhammad Farid Fitri *et al.* Biodiesel production from waste cooking oil using nickel doped onto eggshell catalyst. *In*: 2020a *Materials Today: Proceedings*. [*S. l.*]: Elsevier Ltd, 2020. p. 342–346.

KARKAL, Sandesh Suresh *et al.* Production optimization, scale-up, and characterization of biodiesel from marine fishmeal plant oil using Portunus sanguinolentus crab shell derived heterogeneous catalyst. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, [*s. l.*], v. 47, p. 102571, 2023.

KESHARVANI, Sujeet *et al.* Optimization, production, and environmental sustainability of clean energy fuel utilizing reused cooking oil employing CaO catalysts. *Sustainable Energy Technologies and Assessments,* [*s. l.*], v. 63, p. 103655, 2024.

KIEHBADROUDINEZHAD, Mohammadali; MERABET, Adel; HOSSEINZADEH-BANDBAFHA, Homa. A life cycle assessment perspective on biodiesel production from fish wastes for green microgrids in a circular bioeconomy. *Bioresource Technology Reports*, [*s. l.*], v. 21, 2023.

KNOTHE. *Manual do Biodiesel.* Curitiba; Blucher, 2006. p. 340

KUMAR, Harendra; ANNAM RENITA, A.; ANDERSON, A. Response surface optimization for biodiesel production from waste cooking oil utilizing eggshells as heterogeneous catalyst. *In*: , 2021. *Materials Today: Proceedings*. [*S. l.*]: Elsevier Ltd, 2021. p. 1054–1058.

LIU, Sitong *et al.* Biodiesel production from waste cooking oil through transesterification catalyzed by the strontium-zinc bifunctional oxides. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, [*s. l.*], v. 200, p. 109777, 2024.

LIU, Yanbing *et al.* Economic evaluation and production process simulation of biodiesel production from waste cooking oil. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, [*s. l.*], v. 4, 2021.

LÔBO, Ivon Pinheiro *et al.* Biodiesel: parâmetros de qualidade e métodos analíticos *Quim. Nova*. [*S. l.: s. n.*], 1996.

LOURENÇO, Vitor Alves *et al.* Investigation of ethyl biodiesel via transesterification of rice bran oil: bioenergy from residual biomass in Pelotas, Rio Grande do Sul - Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [*s. l.*], v. 144, 2021.

MAHMOOD KHAN, Haris *et al.* Sustainable biodiesel production from waste cooking oil utilizing waste ostrich (Struthio camelus) bones derived heterogeneous catalyst. *Fuel*, [*s. l.*], v. 277, 2020.

MARCINIUK, L.L. et al. *Análise qualitativa do biodiesel de óleo de frango residual através de métodos simples e de baixo custo*. 1 jan. 2021.

MAWLID, Omar A. *et al.* Clean approach for catalytic biodiesel production from waste frying oil utilizing K2CO3/Orange peel derived hydrochar via RSM Optimization. *Journal of Cleaner Production*, [*s. l.*], v. 442, p. 140947, 2024.

MOHADESI, Majid *et al.* Transesterification of waste cooking oil using Clay/CaO as a solid base catalyst. *Energy*, [*s. l.*], v. 242, p. 122536, 2022.

MOHAMED, R. M. *et al.* Optimizing Operating Conditions for Maximum Biodiesel Production from Salmon Fish Oil. *Egyptian Journal of Chemistry*, [*s. l.*], v. 67, n. 13, p. 307–312, 2024.

MOHAMMED, Alaa K.; ALKHAFAJE, Zahraa A.; RASHID, Israa M. Heterogeneously catalyzed transesterification reaction using waste snail shell for biodiesel production. *Heliyon*, [*s. l.*], v. 9, n. 6, 2023.

MOHEBOLKHAMES, Erfan; KAZEMEINI, Mohammad; SADJADI, Samahe. Utilization of Salmon fish bone wastes as a novel bio-based heterogeneous catalyst-support toward the production of biodiesel: Process optimizations and kinetics studies. *Materials Chemistry and Physics*, [*s. l.*], v. 311, p. 128522, 2024.

MORAES, Paola Silveira *et al.* Nile tilapia industrialization waste: Evaluation of the yield, quality and cost of the biodiesel production process. *Journal of Cleaner Production*, [*s. l.*], v. 287, 2021.

MORAIS, Marcos O., SANTOS, Daiane S., SILVA, Josiele F. Biodiesel a partir da logística reversa do óleo de cozinha usado: estudo de caso em uma empresa de reciclagem. *Research, Society and Development*. V.13, n.5, 2024.

MOTA, C. J. A., MONTEIRO, R. S. Química e sustentabilidade: novas fronteiras em biocombustíveis. *Química Nova*, v. 36, n. 10, p. 1483 – 1490, 2013.

MUHAMMED NIYAS, M.; SHAIJA, A. Biodiesel production from coconut waste cooking oil using novel solar powered rotating flask oscillatory flow reactor and its utilization in diesel engine. *Thermal Science and Engineering Progress,* [*s. l.*], v. 40, p. 101794, 2023.

NADALETI, Willian *et al.* Generation of biodiesel and glycerol from waste of rice industries in Brazil. *In*: 2021a. *AIP Conference Proceedings*. [*S. l.*]: American Institute of Physics Inc., 2021.

NADEEM, F. *et al.* Eco-benign biodiesel production from waste cooking oil using eggshell derived MM-CaO catalyst and condition optimization using RSM approach. *Arabian Journal of Chemistry*, [*s. l.*], v. 14, n. 8, 2021.

NAEEM, Marwa M. *et al.* One-pot conversion of highly acidic waste cooking oil into biodiesel over a novel bio-based bi-functional catalyst. *Fuel,* [*s. l.*], v. 283, 2021.

NAYAK, S. K. *et al.* Influence of fish oil and waste cooking oil as posts mixed binary biodiesel blends on performance improvement and emission reduction in diesel engine. *Fuel*, [*s. l.*], v. 289, 2021.

OLIVEIRA, Carlos de Jesus *et al.* Estudo da estabilidade oxidativa do biodiesel a partir do óleo de pequi após diferentes tempos de fritura. *Revista Tecnológica*, [*s. l.*], v. 29, n. 2, p. 460–474, 2020.

OLIVEIRA, Keverson Gomes de *et al.* Catalisador obtido de casca da tangerina 'ponkan' (citrus reticulata blanco) aplicado na produção de biodiesel. *In: Ciências agrárias*: o avanço da ciência no Brasil - VOLUME 1. [*S. l.*]: Editora Científica Digital, 2021. p. 168–183.

OLIVEIRA, Clarissa; ANDRADE, Paula; DOS SANTOS, Maria. Revisão sistemática da logística reversa do óleo vegetal residual para a fabricação de biodiesel. *Exacta*, [*s. l.*], 2022.

OLIVEIRA, Kleidson Henrique Passos de; ANDRADE, Priscyla Lima de. Síntese, tratamento e caracterização físico-química do biodiesel proveniente do óleo de soja residual do processo de fritura da batata. *in*: *Agricultura e agroindústria no contexto do desenvolvimento rural sustentável.* [*S. l.*]: Editora Científica Digital, 2021. p. 389–401.

OSAGIEDE, Charity Aghariagbonse; AISIEN, Felix Aibuedefe. Biochar-based bi-functional catalyst derived from rubber seed shell and eggshell for biodiesel production from waste cooking oil. *Fuel*, [*s. l.*], v. 358, p. 130076, 2024.

OUTILI, Nawel *et al.* Biodiesel production optimization from waste cooking oil using green chemistry metrics. *Renewable Energy*, [*s. l.*], v. 145, p. 2575–2586, 2020.

PAIXÃO DO NASCIMENTO, Joyce *et al.* Beneficiamento do óleo residual de fritura para produção de biocombustível catalisado com lama vermelha. *Scientia Amazonia*, **v**. [*S. l.: s. n.*], 2021. Disponível em: http://www.scientia-amazonia.org.

PARANDI, Ehsan *et al.* Biodiesel production from waste cooking oil using a novel biocatalyst of lipase enzyme immobilized magnetic nanocomposite. *Fuel*, [*s. l.*], v. 313, p. 123057, 2022.

PATCHIMPET, Jaran *et al.* Optimization of process variables for the production of biodiesel by transesterification of used cooking oil using lipase from Nile tilapia viscera. *Renewable Energy*, [*s. l.*], v. 153, p. 861–869, 2020.

PATIÑO, Yolanda *et al.* Biodiesel production from sewage sludge using supported heteropolyacid as heterogeneous acid catalyst. *Journal of Environmental Management*, [*s. l.*], v. 365, 2024.

PETRUCELLI, Giovanni Cavichioli *et al.* Produção de biodiesel Fonte aternativa renóvavel / Biodiesel production Aternative renowable source. *Brazilian Journal of Development*, [*s. l.*], v. 7, n. 8, p. 81647–81651, 2021.

PHAM, Em Canh *et al.* Optimization of microwave-assisted biodiesel production from waste catfish using response surface methodology. *Energy Reports*, [*s. l.*], v. 8, p. 5739–5752, 2022.

PUTRA, Meilana Dharma; NATA, Iryanti Fatyasari; IRAWAN, Chairul. Biodiesel production from waste cooking oil using heterogeneous catalyst: Biodiesel product data and its characterization. *Data in Brief*, [*s. l.*], v. 28, 2020.

RAMLEE, Nurfadhila Nasya *et al.* Esterification of a waste cooking oil using metal-hybrid catalysts for chemoenzymatic reactions. *In*: 2020. *Materials Today: Proceedings*. [*S. l.*]: Elsevier Ltd, 2020. p. 1280–1286.

RAVAGLIA, Patrick Marques *et al.* Projeto de uma miniusina piloto de baixo custo para produção de biodiesel a partir do óleo de cozinha usado. *DELOS: DESARROLLO LOCAL SOSTENIBLE*, [*s. l.*], v. 16, n. 43, p. 947–957, 2023.

Retraction: response surface methodology based prediction of biodiesel production from sardine fish oil methyl ester using microwave assisted transesterification method (iop conf. ser.: mater. SCI. ENG. 1145 012071). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, [*s. l.*], v. 1145, n. 1, p. 012190, 2021.

RODRIGUES, Wesley; MISTURA, Clóvia. Produção de biodiesel a partir de diferentes matérias-primas: uma revisão the production of biodiesel from different raw materials: a review. *Revista CIATEC-UPF*. [*S. l.: s. n.*], 2022.

ROSA, Anderson *et al. Produção de biodiesel de óleo cru refinado e óleo de fritura de soja.* [*s. l.*], n. 2, p. 59–66, 2020.

SANTOS, E. et al. Análise de Pó de Mármore para Produção de Biodiesel. *Revista Processos Químicos,* v. 16, n. 32, p. 31–38, 2022.

SANTOS, Maria S. F. dos, OLIVEIRA, Clarissa M. R. Análise da logística reversa do óleo vegetal residual na cidade de Teresina (PI). *Mix Sust,* v.8, n.1, p. 134-143, 2022.

SATHISH, T. *et al.* Enhanced waste cooking oil biodiesel with Al2O3 and MWCNT for CI engines. *Fuel*, [*s. l.*], v. 333, p. 126429, 2023.

SATHISH, T. *et al.* Waste to fuel: A detailed combustion, performance, and emission characteristics of a CI engine fuelled with sustainable fish waste management augmentation with alcohols and nanoparticles. *Energy*, [*s. l.*], v. 299, p. 131412, 2024.

SATHIYAMOORTHI, Ezhaveni *et al.* Effect of solar powered MgO/graphene nano catalysed biodiesel production from Scomber scombrus. *Environmental Research,* [*s. l.*], v. 258, p. 119407, 2024.

SHALFOH, Ehsan *et al.* Fish waste oil extraction using supercritical CO2 extraction for biodiesel production: Mathematical, and kinetic modeling. *Renewable Energy*, [*s. l.*], v. 220, p. 119659, 2024.

SHARMA, Vikas *et al.* Investigation of anaerobic digested pyrolysis oil and waste derived biodiesel blends as sustainable fuel for marine engine application. *Fuel*, [*s. l.*], v. 357, p. 129935, 2024.

SHARMA, Vikas *et al.* Investigation on yield, fuel properties, ageing and low temperature flow of fish oil esters. *Energy Conversion and Management: X*, [*s. l.*], v. 14, 2022.

SILVA, Carmem Lisandra Couto da *et al.* Obtenção e caracterização de biodiesel metilíco de óleos de aves. *In*: *Energias renováveis e valorização de resíduos: o caminho para a sustentabilidade,* VOLUME 2. [*S. l.*]: Editora e-Publicar, 2022. p. 155–169.

SILVA, Carmem Cícera Maria da; FONSECA, Gustavo Graciano. Avaliação de técnicas de refino de óleo reciclado para a produção biodiesel. *Brazilian Journal of Production Engineering - BJPE*, [*s. l.*], p. 169–176, 2021.

SILVA et al. Tecnologia de MoO3 como catalisador para produção de biodiesel utilizando óleo residual: Otimização do processo. *Engenharia, Gestão e Inovação***.** vol.10. 1 jan. 2023.

SILVA, M. P. D.; GLORIA, J. S.; PANTA, D. A. S.; VIEIRA, G. E. G. Microalgas e a terceira geração de biocombustíveis: desafios atuais e perspectivas futuras. *Revista Desafios,* v.08, n.03, p. 1 – 19, 2021

SILVA, Thalita; GOES DA ROCHA, Brismark; BASILIO DE CALAND, Lilia. Purificação do Óleo de Fritura com Adsorventes Naturais para a Produção de Biodiesel. *Revista de Ciências Exatas e Tecnologia,* [*s. l.*], v. 15, n. 15, p. 80–87, 2021.

SILVA VASCONCELOS, Yanka *et al.* Aproveitamento do rejeito de pescado para produção de biodiesel. *Peer Review*, [*s. l.*], v. 5, n. 21, p. 162–177, 2023.

SIVARETHINAMOHAN, Sujatha *et al.* Towards sustainable biodiesel production by solar intensification of waste cooking oil and engine parameter assessment studies. *Science of the Total Environment*, [*s. l.*], v. 804, 2022.

SUZIHAQUE, M. U.H. *et al.* A sustainability study of the processing of kitchen waste as a potential source of biofuel: Biodiesel production from waste cooking oil (WCO). *In*: 2022. *Materials Today: Proceedings.* [*S. l.*]: Elsevier Ltd, 2022. p. S484–S489.

ULAKPA, Wisdom C. *et al.* Statistical optimization of biodiesel synthesis from waste cooking oil using NaOH/ bentonite impregnated catalyst. *Cleaner Waste Systems,* [*s. l.*], v. 3, 2022.

VALENTINI, Marlon Heitor Kunst *et al.* Variation in the proportion of coconut oil mixed with fish oil: an analysis of the effect on the oxidative potential and quality of the biodiesel produced. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, [*s. l.*], v. 12, n. 8, p. 288–301, 2021.

WEI, Han *et al.* Efficient biodiesel production from waste cooking oil by fast co-immobilization of lipases from Aspergillus oryzae and Rhizomucor miehei in magnetic chitosan microcapsules. *Process Biochemistry*, [*s. l.*], v. 125, p. 171–180, 2023.

HONÓRIO, Glaucio Gualtieri. Possui graduação em Química (bacharelado) pela Universidade Federal de Juiz de Fora (2010), Mestrado em Química com ênfase em Química Analítica pela mesma instituição (2013), e Doutorado em Ciências pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2019) atuando na área de química analítica, com ênfase em eletroanalítica e química do meio ambiente. Atuou na implementação do Laboratório de Qualidade Ambiental do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Juiz de Fora como bolsista DTI do CNPQ. Atuou como professor substituto EBTT de ensino superior no Departamento de Engenharia Ambiental do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ), assim como no Instituto de Química, no Departamento de Físico-Química da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Atualmente ocupa cargo de professor adjunto nível 1 do Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) e membro do CESA (curso de especialização em Engenharia Sanitária e Ambiental), desenvolvendo pesquisas na área de Química do meio ambiente.

Produção de biogás através de esgoto urbano

OLIVEIRA, Luana Bolivio de
SILVA, Mariana Colletti da
MAZZONETTO, Alexandre Witier

Resumo

A biodigestão anaeróbia do esgoto urbano e lodo de esgoto foi objeto do presente trabalho, visando demonstrar a viabilidade da elaboração de plantas de biogás nas estações de tratamento de esgoto situadas na região de Piracicaba. É notório que os biodigestores podem desempenhar um papel crucial no tratamento do esgoto urbano oferecendo uma abordagem inovadora e ambientalmente responsável, para lidar com os desafios relacionados ao saneamento básico nas áreas urbanas. A implementação efetiva dessa tecnologia poderia não apenas diversificar a matriz energética do país, mas também gerar retornos financeiros significativos. A pesquisa foi conduzida através da montagem de pequenos biodigestores no volume de 10 litros, utilizando amostras de esgoto bruto e lodo de esgoto coletadas na Estação de Tratamento de Esgoto Piracicamirim em Piracicaba no estado de São Paulo. No material coletado foram realizadas análises de pH, DBO e DQO nos laboratórios da empresa Mérieux Nutrisciences. Essas mesmas análises foram realizadas após o processo de biodigestão. Foi estabelecido uma relação entre os aspectos físico-químicos e a eficiência do processo de biodigestão anaeróbia, com e sem o uso de inóculo suíno como catalisadores no processo. Foi realizada comparação da capacidade de produção de biogás de cada matéria-prima. Verificou-se que o lodo de esgoto, apresentou maior degradabilidade da matéria orgânica, eficiência e produção de biogás quando comparado ao esgoto, demonstrando melhor para aproveitamento energético.

Palavras chave: Biogás; Esgoto urbano; energia renovável; Inóculo, DBO.

Abstract

The anaerobic biodigestion of urban sewage and sewage sludge was the focus of the present study, aiming to demonstrate the feasibility of developing biogas plants at sewage treatment stations located in the Piracicaba region. It is well known that biodigesters can play a crucial role in the treatment of urban wastewater, offering an innovative and environmentally responsible approach to address challenges related to basic sanitation in urban areas. The effective implementation of this technology could not only diversify the country's energy matrix but also generate significant financial returns. The research was conducted through the assembly of small-scale biodigesters with a volume of 10 liters, using samples of raw sewage and sewage sludge collected at the Piracicamirim Sewage Treatment Station in Piracicaba, in the state of São Paulo. The collected material was analyzed for pH, BOD, and COD at the laboratories of the company Mérieux Nutrisciences. These same analyses were conducted after the biodigestion process. A relationship was established between the physicochemical aspects and the efficiency of the anaerobic biodigestion process, with and without the use of swine inoculants as catalysts in the process. A comparison was made of the biogas production capacity of each raw material. It was found that sewage sludge showed greater organic matter degradability, efficiency, and biogas production when compared to sewage, demonstrating better potential for energy recovery.

Keywords: Biogas; Urban sewage; Renewable energy; Inoculum; BOD.

Resumen

La biodigestión anaeróbica de aguas residuales urbanas y lodos de depuradora fue el objeto del presente trabajo, con el objetivo de demostrar la viabilidad de la implementación de plantas de biogás en las estaciones de tratamiento de aguas residuales situadas en la región de Piracicaba. Es notorio que los biodigestores pueden desempeñar un papel crucial en el tratamiento de aguas residuales urbanas, ofreciendo un enfoque innovador y ambientalmente responsable para afrontar los desafíos relacionados con el saneamiento básico en las zonas urbanas. La implementación efectiva de esta tecnología podría no solo diversificar la matriz energética del país, sino también generar retornos financieros significativos. La investigación se llevó a cabo mediante el montaje de pequeños biodigestores con un volumen de 10 litros, utilizando muestras de aguas residuales crudas y lodos de depuradora recolectadas en la Estación de Tratamiento de Aguas Residuales Piracicamirim, en Piracicaba, en el estado de São Paulo. En el material recolectado se realizaron análisis de pH, DBO y DQO en los laboratorios de la empresa Mérieux Nutrisciences. Estos mismos análisis se realizaron después del proceso de biodigestión. Se estableció una relación entre los aspectos físico-químicos y la eficiencia del proceso de biodigestión anaeróbica, con y sin el uso de inóculos porcinos como catalizadores en el proceso. Se realizó una comparación de la capacidad de producción de biogás de cada materia prima. Se observó que los lodos de depuradora presentaron una mayor degradabilidad de la materia orgánica, eficiencia y producción de biogás en comparación con las aguas residuales, demostrando un mejor aprovechamiento energético.

Palabras clave: Biogás; Aguas residuales urbanas; Energía renovable; Inóculo; DBO.

INTRODUÇÃO

O biogás é um gás oriundo da biodigestão anaeróbia de matéria orgânica. As fontes para sua produção são variáveis, sendo elas dejetos de animais, como bovinos, aves de corte e suínos, além de resíduos sólidos urbanos (RSU – parte orgânica), vinhaça e esgoto urbano, sendo esta última a matéria utilizada no presente trabalho para produção de biogás (EMBRAPA, 2021).

O biogás possui diversas aplicações, podendo ser utilizado como fonte de energia para aquecimento e movimentação de maquinário em propriedades rurais, diminuindo custos com energia e evitando o descarte inapropriado de resíduos (Machado, 2013).

É importante ressaltar que quanto maior o teor de metano, mais puro é o biogás. Para que a produção e uso do biogás sejam rentáveis ao produtor rural, é necessário que o gás possua, no mínimo, 70% de metano. A proporção dos gases na mistura varia de acordo com o manejo aplicado no biodigestor (Barros, 2021).

Os experimentos realizados contaram com a utilização de inóculo suíno como catalizador, a fim de comparar a eficiência processo, em relação ao uso ou não desse material. Foram realizadas análises dos pH's, DBO (demanda bioquímica de oxigênio) e DQO (demanda química de oxigênio) do material inoculado e das amostras de esgoto, antes e depois da ocorrência da biodigestão, para identificação da produção e cálculo da eficiência do biogás dos biodigestores montados.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

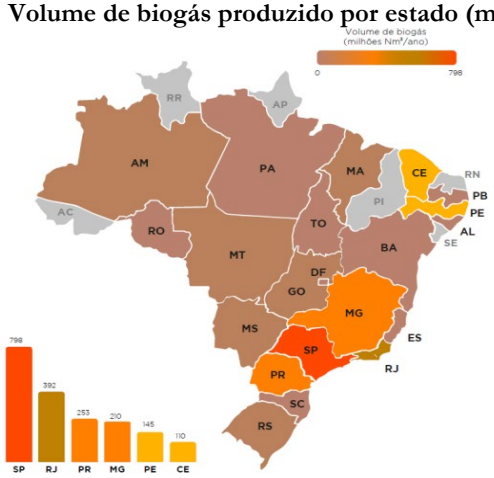
1.1 Panorama Nacional do Biogás

Em 2021 houve um acréscimo de 16% na quantidade de plantas em operação e 10% no volume produzido de biogás comparado ao ano de 2020. Além disso, também em 2021, havia 811 plantas de biogás cadastradas no Brasil, das quais 755 estavam em operação. Outras 102 foram construídas ao longo do mesmo ano, gerando 2,3 bi Nm^3/ano de biogás em operação e mais 209 mil Nm^3/ano em 2021. Além disso, houve um aumento de 10% no volume do gás entre os anos de 2020 e 2021 (Freddo *et al.*, 2022). Além disso, o país conta com seis unidades de plantas de biogás proveniente de resíduos de centros urbanos atualmente (PROBIOGÁS, 2017).

Conforme o último levantamento nacional de biogás realizado de CIBiogás, o número de plantas passou de 655 para 755 no ano de 2021, resultando em um aumento de 16% a nível nacional. Entretanto, ao analisar as regiões brasileiras separadamente, foi possível identificar que alguns estados se mantiveram estagnados enquanto outros fortaleceram a produção do gás. Os estados que mais produzem biogás são: Minas Gerais, Paraná e Santa Catarina, enquanto os estados

com maior registro de crescimento a partir de 2021 foram: São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Goiás (Ramalho, 2022). A relação do volume de gás produzido o redor do Brasil está representado na Figura 1.

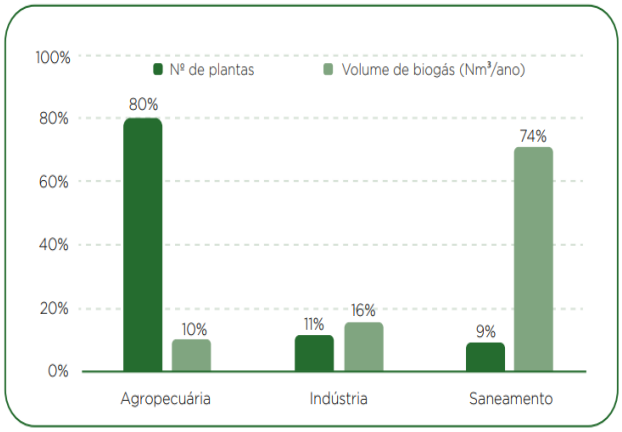
Figura 1: Volume de biogás produzido por estado (milhões Nm³/ano)



Fonte: Freddo *et al.*, (2022).

No Brasil, os principais substratos utilizados para produção de biogás são classificados em três categorias quanto a sua fonte, sendo elas agropecuária, agroindústria e saneamento. Em 2021, a agropecuária foi responsável por 80% das plantas de biogás operantes no país, enquanto os setores agroindustrial e de saneamento contribuíram em 11% e 9%, respectivamente, na quantidade de plantas do combustível. Referente ao volume de biogás, destacou-se o setor de saneamento, pois produziu cerca de 74% do volume total produzido, enquanto o setor industrial produziu 16% e o agropecuário apenas 10% (Freddo *et al.*, 2022). A Figura 2 representa o desenvolvimento das plantas nos últimos anos.

Figura 2: Crescimento do número de novas plantas ao longo do tempo



Fonte: Freddo *et al.*, (2022).

1.2 Estágios da Biodigestão Anaeróbica

O processo para obtenção de biogás é denominado digestão anaeróbia, ou seja, ocorre na ausência de oxigênio. Segundo Kunz (2022), tal processo possui quatro etapas, sendo elas:

a) Hidrólise

A fase hidrolítica é o período de degradação de compostos complexos como lipídeos, polissacarídeos e proteínas em monômeros, compostos de baixa complexidade e substâncias solúveis. Este processo ocorre pela ação de enzimas extracelulares oriundas das bactérias hidrolíticas. A influência da hidrólise na velocidade da degradação do substrato é dependente das características do mesmo.

b) Acidogênese

Fase em que os produtos resultantes da hidrólise são metabolizados no interior das bactérias anaeróbias em álcoois (etanol), cetonas, aldeídos, hidrogênio, dióxido de carbono e, essencialmente, ácidos orgânicos (acético, propiônico, butírico e lático). A pressão parcial de hidrogênio influencia diretamente a oxidação de produtos. Caso for elevada, resultará em substâncias com maior quantidade de carbono.

c) **Acetogênese**

É a fase responsável pela oxidação das substâncias geradas na acidogênese. Ocorre a produção de ácidos orgânicos pela ação das bactérias sintróficas acetogênicas. Os produtos gerados nessa fase são acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. A equação geral que representa tal fase do processo está representada a seguir na equação 1.

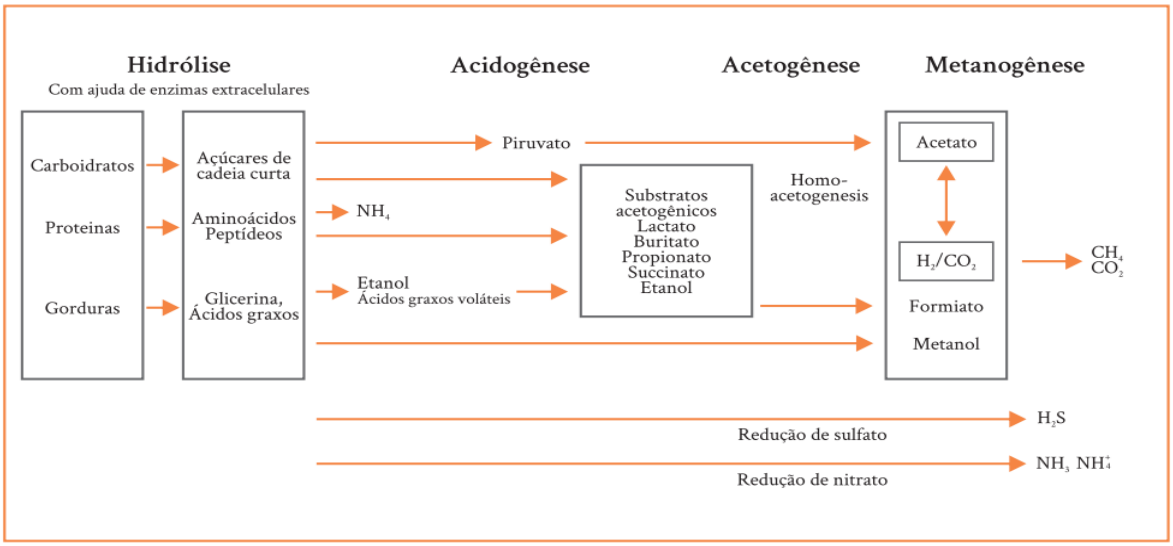
$$2CO_2 + 4H_2 \rightleftharpoons CH_3COOH + 2H_2O \quad \text{(Equação 1)}$$

d) Metanogênese

É a etapa final do processo de biodigestão anaeróbia. Através da ação das arqueas metanogênicas, o carbono contido na biomassa é transformado em dióxido de carbono e metano. Vale ressaltar que as arqueas metanogênicas são classificadas em acetoclásticas e hidrogenotróficas. As acetoclásticas convertem acetato em metano, enquanto as hidrogenotróficas convertem hidrogênio e gás carbônico em metano.

O processo completo de biodigestão anaeróbia pode ser resumido através da Figura 3.

Figura 3: Biodigestão anaeróbia



Fonte: Kunz *et al.*, (2022).

1.3 Princípios do Biodigestor Anaeróbico

Os biodigestores são amplamente utilizados como alternativa para aproveitamento de resíduos agrícolas, gerando como produtos principais, energia e biofertilizante. Em seu sistema possuem uma câmara principal onde é adicionada a matéria orgânica que sofrerá degradação. Essa câmara pode apresentar uma estrutura cíclica, vertical e superficial, ou seja, se encontram acima do nível do solo, com uma estrutura específica onde é acumulado o gás obtido a partir da biodigestão, conhecido como gasômetro. Todo o processo de degradação ocorre na ausência de oxigênio, por meio da digestão de bactérias anaeróbias (Frigo *et al,* 2015).

Existem diversos modelos de biodigestores com características muito diferentes entre si, esses sistemas são separados em dois grupos; os biodigestores contínuos e os não contínuos ou descontínuos. Os contínuos são aqueles onde a matéria orgânica é adicionada ao reator com certa frequência por meio de uma caixa de entrada, dessa forma a degradação ocorre de forma constante e ininterrupta, como exemplo de reatores contínuos temos os biodigestores indianos, chineses e canadenses contínuos (Tarrento, 2006).

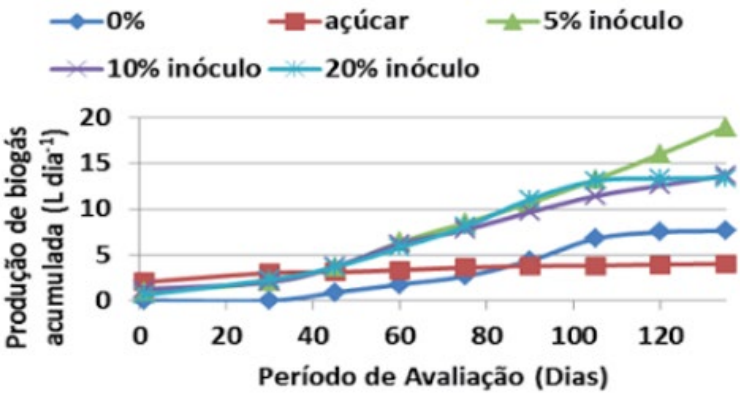
Já no sistema descontínuo o reator é abastecido apenas uma vez e selado até a retirada dos produtos. Geralmente são implementados em áreas onde não há disponibilidade frequente de matéria prima como em granjas avícolas de corte, pois nessas instalações os dejetos ficam disponíveis para a coleta após a venda das aves e são recolhidos durante a limpeza dos galpões, como exemplo de reator descontínuo temos o biodigestor a batelada (Frigo *et al*, 2015).

1.4 Utilização de Inóculo

Para que o processo de degradação ocorra em um menor espaço de tempo utiliza-se da técnica de inoculação do reator recém montado, o inóculo representa uma parcela de substrato retirado de outro reator que já apresenta as quatro fases de degradação completas, esse material é então adicionado ao biodigestor pretendido, ajudando na adaptação e sucesso das bactérias presentes no dejeto (EMBRAPA, 2012).

Reatores que não apresentam adição de inóculo podem levar até 120 dias para o início da produção de biogás, além disso o volume de biogás produzido pode ser menor quando comparado com os inoculados, A parcela de inóculo ideal em reatores é de 20% do volume total, porém mesmo em menores quantidades o resultado é satisfatório. A Figura 4 demonstra graficamente o conceito apresentado (LUCAS JR. *et al.*,1993).

Figura 4: Relação entre a porcentagem de inóculo e a produção de biogás



Fonte: EMBRAPA, (2012).

Por outro lado, quando o inóculo utilizado apresenta baixa eficiência, sua utilização poderá afetar o sistema como um todo, uma vez que ocupará o volume que poderia ser preenchido com substrato a ser tratado (Steil, 2001).

1.5 Caracterização do Esgoto Urbano

Conforme a definição da NBR 9.648 (ABNT, 1986) o esgoto urbano é o "despejo líquido constituído de esgotos domésticos e industriais, água de infiltração e a contribuição pluvial parasitária", portanto, o esgoto que chega nas estações de tratamento é composto pelos despejos de quaisquer estabelecimentos que possuam banheiros, cozinhas ou áreas de lavagem, além dos despejos oriundos das indústrias. A caracterização dos esgotos sanitários pode ser realizada

segundo parâmetros físicos como temperatura, cor, odor e turbidez, biológicos e químicos. A Tabela 1 apresenta as principais características do esgoto sanitário.

Tabela 1: Caracterização físico-química do esgoto urbano

Parâmetro	Descrição	Faixa de concentração típica	Unidade
Sólidos Totais	Sólidos suspensos + dissolvidos + sedimentáveis (orgânico e inorgânico).	700-1350	mg/L
Sólidos suspensos (SS)	Parte orgânica e inorgânica dos sólidos que não são filtráveis.	200-450	mg/L
Fixos (SSF)	Compostos minerais, inertes, que são parte dos SS.	40-100	mg/L
Voláteis (SSV)	Compostos orgânicos, oxidável pelo calor, parte dos SS.	165-350	mg/L
Sólidos dissolvidos (SD)	Parte orgânica e inorgânica dos sólidos que são filtráveis.	500-900	mg/L
Fixos (SDF)	Compostos minerais dos SD.	200-500	mg/L
Voláteis (SDV)	Compostos orgânicos dos SD.	200-350	mg/L
Sólidos sedimentáveis	Parte orgânica e inorgânica dos sólidos que sedimentam.	10-20	mg/L
Matéria orgânica	Mistura homogenia de vários compostos orgânicos (proteínas, lipídios, carboidratos,etc).		
Determinação indireta			
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio.	250-600	mg/L
DQO	Demanda Química de Oxigênio.	450-800	mg/L
Nitrogênio total	É essencial para crescimento microbiológico.	35-60	mgN/L
Fósforo total	É um nutriente essencial para o crescimento biológico dos microrganismos.	4-15	mgP/L
pH	Os processos de oxidação biológica normalmente tendem a reduzir o pH.	6,7-8,0	-
Alcalinidade	Indicador da capacidade tampão do meio, causada pela presença de íons de bicarbonato, carbono e hidroxila.	100-250	mgCaCo3/L

Fonte: Adaptado de Kunz *et al.* (2022).

A composição do biogás oriundo de resíduos do tratamento de esgoto urbano é mais diversificada do que o biogás proveniente do tratamento de resíduos sólidos urbanos (RSU). A presença de H_2S, como dito anteriormente, é corrosiva, por isso a produção do gás é voltada essencialmente para a geração de energia elétrica (Rodrigues, 2022). A composição do gás está representada na Tabela 2.

Tabela 2: Composição do biogás proveniente do tratamento do esgoto urbano

Componentes	Biogás tratamento de esgoto sanitário
CH_4	60 - 85%
CO_2	5 – 24,1%
N_2	6,7 – 25%
H	0 – 0,3%
H_2S	1000 a 2000 ppmv
CO	0 – 3%
O_2	0,4 – 1,6%

Fonte: Rodrigues (2022).

1.6 Potencial Energético do Esgoto Urbano

Segundo Santiago (2019), os efluentes urbanos possibilitam a produção de energia elétrica através da remoção da carga orgânica. A Tabela 3 representa o potencial energético do esgoto para a produção de biogás por região brasileira no ano de 2016.

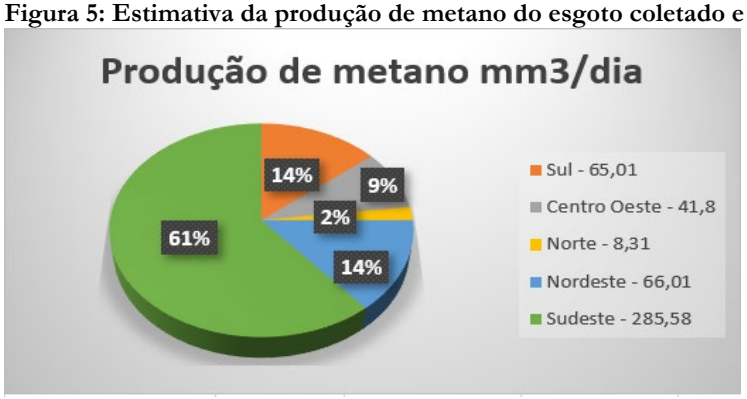
Tabela 3: Estimativa da produção de metano

		Esgoto coletado e tratado		
Região	**Vazão média m3/dia (Q)**	**DBO mg/L**	**% de CH_4**	**Produção de metano Mm3/dia**
Nacional	11.111.900	350	60%	466,70
Norte	197.744	350	60%	8,31
Nordeste	1.571.500	350	60%	66,01
Sudeste	6.799.470	350	60%	285,58
Sul	1.547.850	350	60%	65,01
Centro-Oeste	995.289	350	60%	41,80
		Esgoto coletado e não tratado		
Região	**Vazão média m3/dia (Q)**	**DBO mg/L**	**% de CH_4**	**Produção de metano Mm3/dia**
Nacional	3.885.072,00	350	60%	63,17
Norte	49.796,71	350	60%	2,09
Nordeste	371.126,90	350	60%	15,59
Sudeste	3.272.936,00	350	60%	137,46
Sul	105.596,30	350	60%	4,44
Centro-Oeste	85.612,75	350	60%	3,60

Fonte: Adaptado de Santiago (2019).

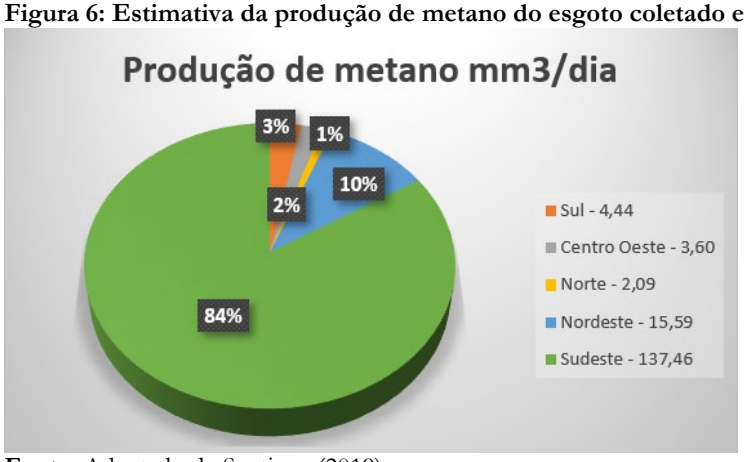
De acordo com Santiago (2019), há distinção no potencial energético do esgoto não tratado em relação ao esgoto tratado adequadamente. Para realizar a estimativa de biogás gerada por cada tipo de efluente, é necessário conhecer a vazão média de entrada do efluente no sistema de tratamento, a DQO média e o índice de produção de biogás em função da DQO gerada. As figuras a seguir demonstram o comparativo entre o potencial do esgoto tratado e do esgoto bruto para produção do gás. É importante ressaltar que para realização dos cálculos foram utilizados os seguintes indicadores técnicos: DQO removida (350 mg/L), média de vazão (m^3/dia), produção de metano por Kg de DQO removida e concentração de metano (60%).

Figura 5: Estimativa da produção de metano do esgoto coletado e tratado



Fonte: Adaptado de Santiago (2019).

Figura 6: Estimativa da produção de metano do esgoto coletado e não tratado



Fonte: Adaptado de Santiago (2019).

1.7 Relação entre pH e a Produção de Biogás

O potencial Hidrogeniônico (pH) tem importante papel na biodigestão anaeróbica, uma vez que os microrganismos responsáveis por esse processo são sensíveis à possíveis variações do meio, o pH não favorável pode ocasionar na inibição do processo e até mesmo na morte de parte dos microrganismos e bactérias. A faixa ideal para o desenvolvimento das bactérias metanogênicas

é de 6,5 a 7,6, enquanto a maior produção de CH2 ocorre na faixa de 7 a 7,2, valores inferiores a 6 ou superiores a 7,6 ocasionam na inibição da atividade microbiana (Bidone e Povinelli, 1999).

O presente trabalho busca comprovar a viabilidade da produção de biogás a partir de esgoto urbano e lodo de esgoto coletados na Estação de Tratamento de Esgoto Piracicamirim, em Piracicaba, cidade situada no Estado de São Paulo. Além da comprovação de produção do gás, o estudo visa salientar o potencial energético do esgoto urbano.

2 METODOLOGIA

2.1 Caracterização do Ponto e Coleta das Amostras

A coleta das amostras para elaboração do estudo foi realizada na Estação de Tratamento de Esgoto Piracicamirim no município de Piracicaba, um galão de 10 litros de esgoto bruto foi retirado dos tanques de gradeamento e um galão de mesmo volume de lodo foi retirado dos tanques de decantação para montagem dos reatores. A Figura 7 apresenta uma foto do sistema de saneamento da ETE Piracicamirim.

Figura 7: Panorama geral da ETE Piracicamirim

Fonte: Portal do tratamento de água (2020).

2.2 Montagem dos Biodigestores e Análises Iniciais

A base utilizada para construção dos reatores foram quatro bombonas de 10 litros, duas atribuídas para a comparação da eficiência do esgoto, sendo um esgoto puro (Reator 1) e outra esgoto misturado ao inóculo de dejetos suínos (Reator 2), e as duas restantes foram destinadas ao lodo de esgoto *in natura* (Reator 3) e lodo de esgoto misturado ao inóculo suíno (Reator 4), o volume final de matéria-prima nas bombonas foi de 5L, sendo que 20% desse valor é equivalente ao inóculo adicionado no reator 2 e 4. Após a elaboração dos reatores, foram enviadas amostras dos quatro biodigestores para análise de pH, DBO E DQO.

Os biodigestores foram deixados em um local arejado durante todo o período do experimento que durou 16 semanas, para acompanhar o processo de biodigestão, a cada 15 dias a válvula de gás foi aberta para realização de um teste de chama no gás que era descarregado, para verificar a inflamabilidade do conteúdo produzido, sendo possível identificar o início da produção de metano.

A partir da quarta semana de experimento, os reatores 3 e 4 começaram a apresentar estufamento do diâmetro da bombona e foi possível retirar pequenas quantidades de gás metano, já os reatores 1 e 2 demoraram cerca de 6 semanas para apresentar a primeira produção de biogás. Após a identificação do metano em todos os reatores, as válvulas de gás foram mantidas fechadas para que fosse possível acumular gás e fazer o experimento comparativo de eficiência entre os protótipos. A Figura 8 mostra o modelo de biodigestor elaborado para realização do trabalho.

Figura 8: Modelo do biodigestor desenvolvido

Fonte: Autores.

Ao final do período as válvulas de gás foram abertas e o teste de chama foi repetido e cronometrado em cada reator, para identificação de eficiência na produção de gás. Ao final dos testes, foram retiradas amostras para repetir as análises de pH, DBO e DQO, com finalidade de comparar a degradação da matéria orgânica após o processo de digestão anaeróbica, como é possível observar na Figura 9.

Figura 9: Amostras destinadas ao laboratório de análises

Fonte: Autores.

2.3 Realização dos Cálculos de Eficiência a Partir da Demanda Química de Oxigênio

A eficiência do processo além de ser determinado pela quantidade de biogás produzido, também pode ser quantificado pela retirada de carga orgânica do resíduo submetido a biodigestão anaeróbica, uma vez que, o DBO é caracterizado pela medição de oxigênio consumido pelos microrganismos, durante o processo de conversão de matéria orgânica em água e gases combustíveis, tendo isso em mente, quanto maior for a retirada de matéria orgânica, mais eficiente será o processo de biodigestão (Moraes, 2022).

A partir do cálculo da variação entre os valores de DBO obtidos inicialmente, antes do processo ocorrer, e final, após o processo de biodigestão, apresentada na equação 2 é possível quantificar a eficiência do processo (Zilotti, 2012).

$$n = (DBOi - DBOf)/ (DBOi) \quad \text{(Equação 2)}$$

Onde:

n = Eficiência (rendimento) do processo.

DBOi = Valor da análise de DBO da amostra antes da biodigestão anaeróbica.

DBOf = Valor da análise de DBO da amostra após da biodigestão anaeróbica.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises de pH foram realizadas em um pHmetro de bancada fornecido pela Mérieux NutriSciences, o resultado demonstrou que as amostras retiradas dos reatores após 16 semanas apresentaram pH na faixa de 6 a 7,3, variação que está dentro dos parâmetros estipulados pela resolução nº430 do Concelho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) de 2011. As amostras não apresentaram grande diferença na faixa de pH quando comparadas aos valores obtidos inicialmente, porém foi possível observar aumento do valor, fazendo com que chegassem mais próximas a alcalinidade, resultado esperado, pois quando os afluentes passam pelo processo de biodigestão, os ácidos presentes são transformados em produtos gasosos (Matos *et. al.*, 2017). A Tabela 5 apresenta a comparação entre os resultados obtidos nas análises iniciais e após 16 semanas de experimento.

Tabela 5: Comparação dos resultados analíticos

	Valores das análises iniciais		
REATORES	**pH**	**DQOi (mg/L)**	**DBOi (mg/L)**
Reator 1 (Esgoto *in* natura)	5,5	395	130
Reator 2 (Esgoto + inóculo)	6,2	2650	382
Reator 3 (Lodo *in* natura)	5,3	6070	626
Reator 4 (Lodo + inóculo)	5,8	9800	890
	Valores obtidos após 16 semanas		
REATORES	**pH**	**DQOf (mg/L)**	**DBOf (mg/L)**
Reator 1 (Esgoto *in* natura)	6	70,1	23,41
Reator 2 (Esgoto + inóculo)	6,7	414	56,12
Reator 3 (Lodo *in* natura)	7,3	84,7	7,95
Reator 4 (Lodo + inóculo)	6,9	604	52,96

Fonte: Autores.

Como é possível observar na Tabela 5, que houve uma redução drástica da carga orgânica presente nos efluentes, demonstrando eficiência dos biodigestores na biodegradabilidade das amostras, pode-se observar que os reatores 3 e 4 apresentaram resultados muito superiores na degradação da matéria orgânica e consequentemente maior aumento do pH em relação aos demais reatores, isso se dá por conta da maior ação de microrganismos presentes no lodo de esgoto, essa eficiência pode ser quantificada utilizando a Equação 1 anteriormente citada, a Tabela 6 apresenta os resultados alcançados utilizando a equação.

Tabela 6: Comparação da eficiência dos reatores

REATORES	DBOi (mg/L)	DBOf (mg/L)	Eficiência (%)
Reator 1 (Esgoto *in* natura)	130	23,41	81,9
Reator 2 (Esgoto + inóculo)	382	56,16	85,3
Reator 3 (Lodo *in* natura)	626	7,95	98,7
Reator 4 (Lodo + inóculo)	890	52,96	94,0

Fonte: Autores.

Todos os biodigestores apresentaram eficiência acima de 80%, e o reator que apresentou resultado mais próximo de 100% foi o reator 3, enquanto o reator 1 apresentou a menor eficiência, além disso o DBO se manteve abaixo de 120 mg/L, valor máximo estabelecido na resolução nº430/2011 CONAMA.

A quantificação do biogás produzido pelos reatores não foi realizada por meio de manômetro ou equipamento específico destinado a essa finalidade. No entanto, presume-se a geração de biogás ao término do experimento, tendo em vista a presença de gases inflamáveis e a posterior realização de sua combustão, o que indica a ocorrência do processo de biodigestão dos afluentes selecionados para o estudo. A medição da quantidade de biogás foi feita a partir da cronometragem do tempo de queima dos gases acumulados em cada biodigestor após as 16 semanas de experimento. A Tabela 7 apresenta a comparação dos tempos de queima de cada biodigestor.

Tabela 7: Comparação do tempo de queima do gás acumulado dos reatores

Reator	Tempo (segundos)
Reator 3 (Lodo *in* natura)	95
Reator 2 (Esgoto + inóculo)	92
Reator 1 (Esgoto *in* natura)	84
Reator 4 (Lodo + inóculo)	72

Fonte: Autores.

A partir desse teste foi constatado que todos em reatores produziram biogás e quando comparado os tempos de queima, o reator 3 apresentou maior eficácia pois permaneceu em queima durante mais tempo, dessa forma, produziu maior quantidade de gás, enquanto o reator 1 apontou menor capacidade de produção de biogás, pois foi observado tempo de queima muito inferior aos demais reatores.

Também foi observada a redução da carga orgânica presente no material, com o uso dos biodigestores, comprovando sua eficiente utilização como tratamento do esgoto, e podendo ser aplicado em maior escala. Todos os parâmetros analisados como, pH, DBO e DQO, se mantiveram dentro dos parâmetros propostos na resolução CONAMA nº430/2011.

A comparação dos resultados apresentados nas Tabelas 5 e 6 evidencia uma correlação entre os parâmetros físico-químicos e a produção de biogás de cada matéria-prima analisada. Observa-se que os reatores que alcançaram valores de pH mais alcalinos foram responsáveis pelas maiores quantidades de biogás gerado. Destacam-se os reatores 3 e 4 que mantiveram-se muito próximos da faixa ideal para a máxima produção de metano (pH entre 7,0 e 7,2), apresentando, consequentemente, o maior volume de biogás produzido. Além disso, a média dos tempos de queima reforça esse resultado: o lodo apresentou um tempo médio de combustão de 89,5 segundos, superior ao tempo registrado para o esgoto, que foi de 82 segundos. Esses dados corroboram a existência de uma relação direta entre o pH do meio e a eficiência na produção de biogás.

Já em relação ao DBO, os reatores que apresentação maior alcalinidade também demonstração maior degradabilidade da matéria orgânica, ou seja, nesses reatores, a variação entre o DBO inicial e final foi maior, pode-se notar na tabela 5 que o reator 4 aparenta ter degradado mais matéria orgânica que o reator 3, pois a redução absoluta (DBOi – DBOf) do reator 4 (837,04mgL) é maior que a do reator 3 (618,05mg/L). No entanto, ao analisar os resultados da tabela 6, verifica-se que o reator 3 apresentou maior eficiência percentual na remoção da DBO, sendo aproximadamente 4% superior à do reator 4, A partir desses resultados foi possível determinar que o reator 3 apresentou maior eficiência entre os reatores avaliados mesmo não sendo o que obteve maior redução absoluta da DBO.

Outro parâmetro avaliado foi o uso de inóculo nos reatores, observando os resultados obtidos foi concluído que os inóculos não apresentaram o resultado esperado, uma vez que o lodo de esgoto in natura demonstrou maior eficiência que o lodo de esgoto tratado com inóculo suíno. Já em relação ao esgoto, a adição de inóculo promoveu uma pequena vantagem no processo em relação ao esgoto puro, porém de modo geral, a aplicação do inóculo não apresentou resultados significativos, possivelmente por conta do tempo de vida útil desse material.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos últimos anos o uso de biodigestores empregados em áreas rurais para lidar com os resíduos dos animais tem crescido muito. Este estudo propôs demonstrar como os biodigestores podem ser úteis também em áreas urbanas, onde os desafios são diferentes. Nas cidades, existe a necessidade em lidar com grande quantidade de resíduos descartados diariamente e a aplicação desse tipo de ferramenta tem se mostrado muito útil quando atrelado a estações de tratamento de esgoto, podendo aumentar sua eficiência, além de gerar como subproduto o biogás que pode ser utilizado para geração de energia elétrica, térmica ou transformado em biocombustível (biometano).

Com base nos resultados obtidos ao longo do experimento, constatou-se que o Reator 3, contendo lodo *in natura*, apresentou o melhor desempenho entre os sistemas avaliados. Esse reator registrou a maior variação entre os valores de pH inicial e final, atingindo o nível mais alcalino, condição que se revelou essencial para a atividade das bactérias responsáveis pela conversão da matéria orgânica em gases inflamáveis. Tal condição justifica a maior produção de biogás observada nesse reator em comparação aos demais. Por outro lado, o uso de inóculo associado ao lodo de esgoto (Reator 4) não apresentou a eficiência esperada, contrariando a hipótese de que a adição de inóculo de origem suína potencializaria o processo de biodigestão. Quanto ao esgoto bruto, os resultados foram menos expressivos, uma vez que a variação de pH foi mínima, limitando a ação microbiológica sobre a matéria orgânica. Essa limitação resultou em uma menor produção de biogás, mesmo com a adição de inóculo.

REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira De Normas Técnicas. Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário. ABNT, 1986. Disponível em: https://allevanteducacao.com.br/wpcontent/uploads/Cursos/[DEFINITIVO]%20SISTEMAS%20DE%20ESGOTO%20SANIT%C3%81RIO%20M%C3%93DULO%202/NBR_9648_Estudos_de_Concepcao_de_Sistema.pdf. Acesso em: 03 abr. 2023.

BARROS, Talita Delgrassi. *Biogás*. EMBRAPA, 2021. Disponível em: https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/p-d-e-i/biogas. Acesso em: 03 abr. 2023.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 92, p. 89-96, 16 maio 2011.

BIDONE, F.R. A; POVINELLI, J. *Conceitos básicos de resíduos sólidos*. São Carlos: EESC/USP, 1999. 120 p.

EMBRAPA. Biogás. Agroenergia, 2021. Disponível em: https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/p-d-e-i/biogas. Acesso em: 22 maio 2025.

FRIGO *et al.* Biodigestores: seus modelos e aplicações**.** *Acta Iguazu*, v. 4, n. 1, p. 57-67, 2015.

FREDDO, Alessandra *et al. Panorama do biogás no Brasil 2021*. 2. ed. Foz do Iguaçu: CIBIogás, 2022.

KUNZ, Airton *et al. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato*. 2. ed. Concórdia, SC: EMBRAPA, 2022.

LUCAS JUNIOR, *et al.* Avaliação do uso de inóculo no desempenho de biodigestores abastecidos com estrume de frangos de corte com cama de maravalha. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 22. 1993, Ilhéus. *Anais*... Ilhéus: SBEA/CEPLAC, 1993. v. 2, p. 915-30.

MACHADO, Gleysson. O que é o biogás. *Portal resíduos sólidos*, 13 de junho de 2013. Disponível em https://portalresiduossolidos.com/biogas/. Acesso em 22 de maio de 2025.

MORAES, Alessandra. *Correlação entre os três métodos de quantificação matéria orgânica:* demanda bioquímica de oxigênio e carbono orgânico total, para análise de biofertilizantes derivado da biodigestão anaeróbia. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

MATOS, C. F.; PAES, J.L.; PINHEIRO, E. F. M.; CAMPOS, D. V. B., 2017a. Produção de biogás a partir de dejetos de bovinos de leite, sob sistema orgânico e convencional de produção. *Revista Engenharia Agrícola*, vol. 37, n. 6, pp. xxx.

RAMALHO, A. *Produção de biogás mais que dobra em 5 anos no Brasil***.** EPBR, 2023. Disponível em: Biogás dobra em cinco anos no Brasil; veja os estados com mais usinas (epbr.com.br). Acesso em: 01 jun. 2024.

RODRIGUES, Larissa. *Panorama de aproveitamento energético do biogás dos tratamentos de esgoto sanitário de resíduos sólidos urbanos*. São Carlos, 2022.

SANTIAGO, H. S.; SANTIAGO, E. L. G. Potencial energético utilizando a produção de biogás em tratamento de esgoto. *Engineering Sciences*, v.7, n.1, p.73-80, 2019.

STEIL, Lara**.** *Avaliação do uso de inóculos na biodigestão anaeróbica de resíduos de aves de postura, frangos de corte e suínos*. Universidade Estadual Paulista Instituto de Química de Araraquara SP, 2001.

TARRENTO. G. E., MARTINES, J. C. Análise da implantação de biodigestores em pequenas propriedades rurais, dentro do contexto da produção limpa. In: *SIMPEP, 13*. 2006. Bauru, SP, Brasil.

ZILOTTI, Hélio. *Potencial de produção de biogás em uma estação de tratamento de esgoto de Cascavel para geração de energia elétrica***.** Cascavel, Paraná, 2012.

1 OLIVEIRA, Luana Bolivio de. Graduação em Tecnologia em Biocombustíveis pela FATEC Piracicaba Dep. "Roque Trevisan" – Centro Estadual de Educação Tecnológica "Paula Souza".

2 SILVA, Mariana Colletti da. Graduação em Tecnologia em Biocombustíveis pela FATEC Piracicaba Dep. "Roque Trevisan" – Centro Estadual de Educação Tecnológica "Paula Souza".

3 MAZZONETTO, Alexandre Witier. Graduação em Engenharia Agrícola pela Universidade Estadual de Campinas - FEAGRI/UNICAMP. Mestrado em Engenharia Agronômica - Máquinas Agrícolas/Biomassa - Colheita Integral de Cana Crua, pela Universidade de São Paulo - ESALQ/USP. Doutorando pela Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas - Departamento de Energia - FEM/UNICAMP (Caracterização e potencial energético de biomassas residuais da região de Piracicaba - SP). Na Graduação envolveu-se em Pesquisa/Desenvolvimento de processos térmicos, desenvolvendo um secador rotativo de sementes e outro de leito fluidizado. Desde o Mestrado vem trabalhando com fontes renováveis de energia e biomassas residuais (tratamento e geração de energia); levando-o a cursar Química na Universidade Mackenzie (Bacharel, Licenciatura e Industrial). Processos térmicos para obtenção de biocombustíveis, gaseificação, pirólise e combustão/incineração, e combustíveis sustentáveis, gás de síntese (Syngas), produção e uso do biogás - biodigestão anaeróbia de diversas biomassas residuais. Professor na FATEC Piracicaba (Biocombustíveis e Gestão Empresarial).

Uso de antimicrobianos naturais na produção de etanol: uma alternativa sustentável para o controle microbiológico

COLI, Dirlei Augusto de Oliveira
PRADA, Marcos Henrique

Resumo

A fermentação alcoólica destaca-se como um processo biológico essencial na produção de etanol, no qual açúcares simples como glicose, frutose e sacarose são metabolizados, resultando na formação de etanol e gás carbônico. Entretanto, esse processo pode ser prejudicado pela presença de bactérias contaminantes que competem com leveduras, comprometendo a eficiência e o rendimento da fermentação. Para minimizar os impactos dessas contaminações, o uso de agentes antibacterianos é uma prática comum. No entanto, é essencial que sua aplicação ocorra de forma consciente e técnica, uma vez que o uso excessivo ou inadequado pode resultar em altos custos operacionais, impactos ambientais negativos e riscos à saúde humana. Nesse contexto, há um interesse crescente por alternativas naturais aos antibacterianos sintéticos. Diversos estudos têm demonstrado a eficácia de compostos naturais, como extrato de própolis, extrato de lúpulo, jambolão, pimenta-rosa e orégano, no controle da carga bacteriana durante a fermentação alcoólica. Além de apresentarem propriedades antimicrobianas eficazes, essas substâncias naturais tendem a ser menos agressivas ao meio ambiente e à saúde humana, promovendo uma abordagem mais sustentável. Essas alternativas representam uma resposta promissora à crescente demanda por processos industriais mais limpos e seguros. Assim, este estudo, por meio de uma revisão bibliográfica, objetiva aprofundar o conhecimento sobre o uso desses extratos naturais no controle de bactérias durante a fermentação, destacando seus benefícios e limitações. A análise dos estudos revisados demonstrou que os extratos naturais apresentam atividade antimicrobiana significativa, contribuindo para a redução da carga bacteriana e para a manutenção da eficiência da fermentação, incentivando a adoção de práticas mais responsáveis no setor sucroalcooleiro.
Palavras-chave: extrato de própolis, jambolão, controle microbiológico, sustentabilidade.

Abstract

Alcoholic fermentation stands out as an essential biological process in ethanol production, in which simple sugars such as glucose, fructose and sucrose are metabolized, resulting in the formation of ethanol and carbon dioxide. However, this process can be impaired by the presence of contaminating bacteria that compete with yeast, compromising the efficiency and yield of fermentation. To minimize the impacts of these contaminations, the use of antibacterial agents is a common practice. However, it is essential that their application occurs in a conscious and technical manner, since excessive or inadequate use can result in high operating costs, negative environmental impacts and risks to human health. In this context, there is growing interest in natural alternatives to synthetic antibacterials. Several studies have demonstrated the effectiveness of natural compounds, such as propolis extract, hop extract, jambolan, pink pepper and oregano, in controlling the bacterial load during alcoholic fermentation. In addition to presenting effective antimicrobial properties, these natural substances tend to be less aggressive to the environment and human health, promoting a more sustainable approach. These alternatives represent a promising response to the growing demand for cleaner and safer industrial processes. Thus, this study, through a literature review, aims to deepen knowledge about the use of these natural extracts in the control of bacteria during fermentation, highlighting their benefits and limitations. The analysis of the reviewed studies showed that natural extracts have significant antimicrobial activity, contributing to the

reduction of bacterial load and to the maintenance of fermentation efficiency, encouraging the adoption of more responsible practices in the sugar and alcohol sector.
Keywords: alcoholic fermentation, propolis extract, jambolan, sustainability

Resumen

La fermentación alcohólica se destaca como un proceso biológico esencial en la producción de etanol, en el cual se metabolizan azúcares simples como la glucosa, la fructosa y la sacarosa, dando lugar a la formación de etanol y dióxido de carbono. Sin embargo, este proceso puede verse afectado por la presencia de bacterias contaminantes que compiten con la levadura, comprometiendo la eficiencia y el rendimiento de la fermentación. Para minimizar el impacto de estas contaminaciones, el uso de agentes antibacterianos es una práctica común. Sin embargo, es esencial que su aplicación se realice de manera consciente y técnica, ya que su uso excesivo o inadecuado puede resultar en altos costos operativos, impactos ambientales negativos y riesgos para la salud humana. En este contexto, existe un creciente interés en alternativas naturales a los antibacterianos sintéticos. Diversos estudios han demostrado la eficacia de compuestos naturales, como el extracto de propóleo, el extracto de lúpulo, el jambolán, la pimienta rosa y el orégano, para controlar la carga bacteriana durante la fermentación alcohólica. Además de presentar propiedades antimicrobianas efectivas, estas sustancias naturales tienden a ser menos agresivas para el medio ambiente y la salud humana, lo que promueve un enfoque más sostenible. Estas alternativas representan una respuesta prometedora a la creciente demanda de procesos industriales más limpios y seguros. Por ello, este estudio, mediante una revisión bibliográfica, busca profundizar en el conocimiento sobre el uso de estos extractos naturales en el control de bacterias durante la fermentación, destacando sus beneficios y limitaciones. El análisis de los estudios revisados mostró que los extractos naturales poseen una importante actividad antimicrobiana, contribuyendo a la reducción de la carga bacteriana y al mantenimiento de la eficiencia de la fermentación, fomentando así la adopción de prácticas más responsables en el sector azucarero y alcohólico.

Palabras clave: fermentación alcohólica, extracto de propóleos, jambolán, sostenibilidad.

INTRODUÇÃO

No cenário contemporâneo, observa-se uma crescente mobilização dos países na busca por fontes de energia limpa, impulsionada pelas mudanças climáticas globais. Uma maneira de diminuir a emissão de poluentes no ar é a adoção de biocombustíveis. Ademais, a alta nos preços do petróleo tem estimulado a utilização de biocombustíveis como uma opção de energia renovável e menos prejudicial ao meio ambiente (BIOBLOG, 2020).

A produção de biocombustíveis, especialmente o etanol, possui grande importância para a matriz energética brasileira e para a mitigação das mudanças climáticas. A participação de diversos profissionais é essencial em um processo transformador que implemente melhores práticas socioambientais na fabricação do etanol originado da cana-de-açúcar (Ernandes; Garcia-Cruz, 2009).

O etanol é obtido pela fermentação do caldo, melaço ou uma combinação de ambos, provenientes de uma fonte renovável abundante no Brasil: a cana-de-açúcar. O caldo de cana e o mosto são substratos ricos em nutrientes orgânicos e inorgânicos, além de apresentarem condições ideais de pH, temperatura e umidade para o crescimento de microrganismos, especialmente bactérias (Alcides, 2018).

Contudo, a produtividade do etanol pode ser comprometida por contaminações microbiológicas, principalmente pela presença de bactérias indesejadas durante o processo fermentativo. A prática comum de reaproveitamento das células de levedura nas usinas, embora vise aumentar a eficiência produtiva, pode recircular bactérias contaminantes presentes desde a colheita até o armazenamento da cana. Essas bactérias competem com as leveduras pelo substrato, reduzindo o rendimento da fermentação e gerando perdas econômicas significativas (Alcides, 2018).

Nesse contexto, o uso de antimicrobianos tem se tornado uma prática comum nas usinas de etanol, com o objetivo de controlar a população bacteriana e preservar o desempenho das leveduras. No entanto, o uso indiscriminado de antibióticos pode acarretar riscos à saúde pública, como o surgimento de cepas resistentes, além de afetar negativamente a microbiota envolvida na fermentação (ANVISA, 2021).

Diante disso, este trabalho tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica teórica sobre o uso de antimicrobianos naturais na fermentação alcoólica, considerando os aspectos microbiológicos, tecnológicos e ambientais envolvidos. Serão abordadas as principais formas de

contaminação, os métodos de controle adotados pelas indústrias e os desafios relacionados à sustentabilidade e à segurança no uso desses compostos.

Dessa forma, este artigo tem por objetivo analisar o uso de antimicrobianos em fermentações alcoólicas, considerando os aspectos microbiológicos, tecnológicos e ambientais envolvidos. Serão abordadas as principais formas de contaminação, os métodos de controle adotados pelas indústrias e os desafios relacionados à sustentabilidade e à segurança no uso desses compostos.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Fermentação Alcoólica

A indústria sucroalcooleira desempenha um papel fundamental na matriz energética brasileira, sendo responsável pela produção de etanol a partir da fermentação alcoólica de substratos como a cana de açúcar. A fermentação alcoólica é um processo bioquímico realizado, principalmente, por leveduras do gênero Saccharomyces cerevisiae, as quais convertem açúcares em etanol e dióxido de carbono.

Tabela 1- Tipos de fermentação alcoólica

Tipos de Fermentação alcoólica	**Descrição**	**Exemplos:**
Fermentação alcoólica	Produz álcool etílico e gás carbônico	Bebidas alcoólicas, pão, combustível
Fermentação lática	Produz ácido lático	Iogurte, coalhada, alguns tipos de queijo
Fermentação acética	Produz ácido acético	Vinagre acético
Fermentação natural	Dependente de microorganismos presentes no ambiente e nos ingredientes	Fermentação natural

Fonte: Autores.

A equação que representa a fermentação alcoólica é:C6H1206 + 2ADP + 2Pi → 2 C2H5OH + 2CO2 + 2ATP. Onde:

- C6H1206 representa a glicose

- 2ADP + 2Pi representa os adenosina difosfato e fosfato inorgânico
- 2 C2H5OH representa o etanol (álcool)
- 2CO2 representa o dióxido de carbono
- 2ATP representa as moléculas de adenosina trifosfato

No entanto, em condições industriais, esse processo está sujeito à contaminação por microrganismos indesejáveis, especialmente bactérias ácido-láticas como Lactobacillus spp., Leuconostoc spp. e Pediococcus spp. Essa contaminação bacteriana comprometem o rendimento e a qualidade do produto final (Freitas & Romano, 2015).

Contaminação Bacteriana na Fermentação Alcoólica

A presença de microrganismos indesejáveis compromete a eficiência da fermentação alcoólica ao competir com as leveduras pelo substrato e produzir metabólitos que inibem o crescimento das mesmas. Segundo Bressani e Ladeira (2019), a presença de bactérias láticas, por exemplo, pode reduzir significativamente a conversão de sacarose em etanol.

Diversos fatores contribuem para a contaminação do processo, como altos teores de sólidos solúveis, temperatura inadequada, tempo de fermentação prolongado e falhas na assepsia dos equipamentos. Silva *et al.* (2018) destacam que o controle rigoroso dessas variáveis é essencial para assegurar uma produção eficiente.

A contaminação bacteriana na fermentação alcoólica pode ser bastante prejudicial ao processo. Pode causar:

- Perda de produtividade
- Redução do volume de etanol
- Aumento dos custos operacionais
- Consumo de açúcar
- Formação de goma
- Fluculação do fermento
- Inibição e queda da viabilidade das leveduras.

É necessário que haja um controle correto das condições operacionais: tempo, temperatura, PH, acidez, quantidade de sacarose para que não haja contaminação no processo.

Avaliação do Etanol como Meio Contaminado

Embora o etanol seja um produto final da fermentação alcoólica e atue como um agente antisséptico em concentrações elevadas, sua presença no meio fermentativo não é suficiente para garantir a completa eliminação de bactérias contaminantes. Isso ocorre porque as bactérias presentes no processo fermentativo, especialmente as do grupo ácido-lático, apresentam alta tolerância ao etanol, sobrevivendo e proliferando mesmo em concentrações que inibiriam outras espécies microbianas (Batista & Francisqueti, 2016).

Durante o processo industrial de produção de etanol, as concentrações alcoólicas variam de 5% a 12%, o que é insuficiente para esterilizar o meio. Além disso, o meio fermentativo apresenta grande quantidade de nutrientes, pH favorável e temperatura ideal para o crescimento bacteriano, tornando-se um ambiente propício à contaminação (Freitas & Romano, 2015).

Um estudo realizado pela Fermentec (2021) demonstrou que, mesmo em fermentações contínuas, com reciclo de leveduras e tratamento térmico parcial, ocorre a persistência de populações bacterianas capazes de causar prejuízos ao rendimento alcoólico. A formação de ácido lático, por exemplo, pode atingir níveis tóxicos para as leveduras, interrompendo sua atividade fermentativa e levando à acidificação do meio.

A necessidade de controle microbiológico é, portanto, inquestionável. O monitoramento da carga bacteriana deve ser feito de forma contínua, por meio de análises microbiológicas, testes de acidez volátil e monitoramento da queda de rendimento alcoólico. Quando identificados surtos de contaminação, a intervenção imediata com antimicrobianos se torna necessária para restabelecer o equilíbrio do processo (Alcides, 2018).

A substituição de antimicrobianos sintéticos por alternativas naturais representa uma solução com múltiplos benefícios, como redução dos resíduos tóxicos, menor impacto ambiental e mitigação do risco de resistência bacteriana.

No entanto, para garantir a eficácia desses compostos naturais, é essencial considerar a complexidade do meio fermentativo e adaptar as estratégias de aplicação conforme as condições específicas de cada unidade produtiva (Silva *et al.,* 2020).

Antimicrobianos: definições

Antimicrobianos são substâncias dotadas da capacidade de reduzir ou eliminar a presença de microrganismos patogênicos, tais como bactérias, fungos, parasitas e vírus, podendo ainda apresentar atividade antineoplásica. Esses agentes exercem diferentes funções terapêuticas, destacando-se por suas propriedades antibacterianas, antifúngicas, antiparasitárias, antivirais e antitumorais.

Quanto à sua origem, os antimicrobianos classificam-se em naturais e sintéticos. Os naturais são oriundos do metabolismo secundário de organismos vivos, incluindo animais, vegetais e outros microrganismos, sendo frequentemente utilizados como base para o desenvolvimento de novas moléculas bioativas, os sintéticos são produzidos através das estruturas dos naturais.

Os antimicrobianos tradicionais, como antibióticos (penicilina, tetraciclina) e agentes oxidantes (como peróxido de hidrogênio), são amplamente utilizados para controlar essas contaminações. Contudo, seu uso contínuo tem gerado preocupações quanto à resistência bacteriana, resíduos no ambiente e impactos sobre as cepas de levedura (Batista & Francisqueti, 2016).

Os antimicrobianos naturais surgem como alternativa viável. Eles podem ser classificados de acordo com sua origem: vegetal (óleos essenciais, taninos, compostos fenólicos), microbiana (bacteriocinas) ou animal (peptídeos antimicrobianos). Além de serem biodegradáveis, geralmente apresentam baixa toxicidade e múltiplos mecanismos de ação, dificultando o desenvolvimento de resistência (Nascimento *et al.*, 2021).

Antimicrobianos Sintéticos

Os antimicrobianos sintéticos são substâncias obtidas por meio de processos artificiais, desenvolvidas a partir do estudo e modificação de compostos antimicrobianos naturais. Incluindo antibióticos e biocidas químicos, esses agentes têm sido amplamente empregados na contenção de contaminações bacterianas durante o processo de fermentação alcoólica. Apesar de sua comprovada eficácia, seu uso contínuo apresenta restrições relevantes.

A exposição prolongada de microrganismos a esses compostos pode resultar no surgimento de cepas bacterianas resistentes, comprometendo sua efetividade terapêutica e industrial ao longo do tempo (Batista & Francisqueti, 2016). Ademais, resíduos desses antimicrobianos podem permanecer

nos subprodutos da fermentação, como a vinhaça — frequentemente reaproveitada como fertilizante agrícola —, o que suscita preocupações de ordem ambiental e regulatória. Tais resíduos têm o potencial de impactar negativamente tanto o ecossistema quanto a saúde humana (Alcides, 2018).

Podemos exemplificar como antimicrobianos sintéticos:

- Sulfonamidas
- Fluroquinolonas
- Cotrimoxazol
- Derivados da penicilina
- Cefalosporina

Riscos do Uso de Antimicrobianos Sintéticos

Tradicionalmente, a indústria de etanol tem recorrido aos antibióticos para combater a contaminação bacteriana; entretanto, o uso recorrente desses compostos tem gerado preocupações ambientais e sanitárias, especialmente devido à presença de resíduos nos subprodutos do processo, sejam eles derivados da cana-de-açúcar, do milho ou de outros cereais.

O uso indiscriminado de antibióticos sintéticos em processos industriais levanta questões quanto à resistência microbiana, contaminação cruzada e impactos à saúde humana e ambiental. Assim, o uso racional e a busca por alternativas naturais são cada vez mais incentivados pela comunidade científica.

Antimicrobianos Naturais

A crescente preocupação com os impactos ambientais e sanitários do uso contínuo de antimicrobianos sintéticos tem impulsionado o desenvolvimento de alternativas mais seguras e sustentáveis. Dentre essas alternativas, os antimicrobianos naturais se destacam como promissoras ferramentas no controle microbiológico da fermentação alcoólica. Esses compostos são oriundos de fontes naturais, como plantas, algas, fungos e bactérias, e apresentam propriedades antimicrobianas que podem ser exploradas sem os efeitos adversos associados aos antibióticos sintéticos (Silva *et al.,* 2020).

Diversos grupos de compostos naturais têm sido estudados, entre eles os óleos essenciais, taninos, alcaloides, flavonoides, compostos fenólicos, bacteriocinas e peptídeos antimicrobianos. Cada um desses grupos possui mecanismos de ação distintos, como a desestabilização da membrana celular, a inibição da síntese proteica ou a interferência na integridade do DNA bacteriano (Nascimento *et al.,* 2021). Essa diversidade de mecanismos torna os antimicrobianos naturais altamente eficazes contra uma ampla gama de microrganismos contaminantes.

Os óleos essenciais, por exemplo, são extraídos de diferentes partes de plantas aromáticas e contêm uma mistura de compostos voláteis como o eugenol, timol, carvacrol e citral. Esses compostos atuam na membrana plasmática bacteriana, provocando sua ruptura e perda de integridade, o que leva à morte celular (Barros *et al.,* 2022). Estudos demonstraram que óleos essenciais de orégano (Origanum vulgare), cravo-da-índia (Syzygium aromaticum) e tomilho (Thymus vulgaris) são eficazes contra espécies do gênero Lactobacillus spp., comumente encontradas em fermentações contaminadas (Silva *et al.,* 2020).

Outro grupo relevante são os compostos fenólicos, encontrados em abundância em extratos vegetais, frutas e cascas de árvores. Esses compostos apresentam alta atividade antioxidante e antimicrobiana, agindo tanto na parede celular bacteriana quanto na formação de biofilmes, dificultando a fixação das bactérias em superfícies de tanques e tubulações (Nascimento *et al.*, 2021).

Além disso, há grande interesse nas bacteriocinas, peptídeos produzidos por algumas bactérias como forma de defesa contra outras espécies.

A nisin, produzida por Lactococcus lactis, é um exemplo de bacteriocina amplamente estudada e aprovada para uso em alimentos, que também demonstra potencial para aplicação industrial no setor de biocombustíveis (Fermentec, 2021). Sua ação consiste na formação de poros na membrana das células bacterianas, causando lise e morte celular.

Os taninos, por sua vez, são compostos polifenólicos encontrados em diversas espécies vegetais e têm capacidade de precipitar proteínas e quelar metais, inibindo enzimas essenciais ao metabolismo bacteriano. Pesquisas indicam que taninos extraídos da casca de acácia e da uva possuem atividade contra bactérias lácticas, sendo viáveis para aplicação na fermentação alcoólica (Barros *et al.,* 2022).

A grande vantagem dos antimicrobianos naturais reside na baixa probabilidade de desenvolvimento de resistência bacteriana, uma vez que seus mecanismos de ação são multifatoriais e atuam simultaneamente em diferentes alvos celulares. Além disso, esses compostos são biodegradáveis,

apresentam baixo impacto ambiental e, na maioria dos casos, são considerados seguros para a saúde humana e animal (Silva *et al.*, 2020).

No entanto, a aplicação em escala industrial ainda enfrenta desafios como a padronização das concentrações ativas, a estabilidade dos compostos em diferentes condições de pH e temperatura e os custos de extração e purificação.

Superar essas barreiras é essencial para viabilizar o uso dos antimicrobianos naturais em substituição aos agentes sintéticos no setor sucroenergético (Nascimento *et al.*, 2021).

Aplicação de Antimicrobianos Naturais e seus Benefícios

A incorporação de antimicrobianos naturais no processo de fermentação alcoólica oferece diversos benefícios. Além de controlar efetivamente as bactérias contaminantes, esses compostos podem melhorar a qualidade do etanol produzido e aumentar a eficiência do processo fermentativo. Adicionalmente, o uso de antimicrobianos naturais pode reduzir a necessidade de produtos químicos sintéticos, alinhando-se às tendências de sustentabilidade e às regulamentações ambientais (Fermentec, 2021).

De acordo com Moreira (2020), compostos como: extrato de própolis, jambolão, pimenta rosa, extrato de lúpulo e extratos vegetais diversos apresentam atividades inibitórias significativas contra bactérias contaminantes.

Billerbeck e Lajolo (2016) ressaltam o baixo impacto ambiental desses agentes, tornando-os alternativas promissoras aos antimicrobianos convencionais. Eles atuam rompendo membranas celulares, inibindo enzimas ou afetando a síntese de proteínas bacterianas. A vantagem desses compostos está na sua baixa toxicidade e sustentabilidade.

Antimicrobianos naturais têm sido estudados por sua ação contra diversos patógenos presentes no meio fermentativo. Embora a ocorrência de contaminações bacterianas em processos fermentativos de larga escala seja, até certo ponto, inevitável, a aplicação criteriosa de antimicrobianos naturais tem se consolidado como uma alternativa eficaz na redução da carga microbiana. Isso proporciona ganhos significativos à produção e agrega valor aos subprodutos destinados ao consumo humano e animal.

Tabela- Antimicrobianos Naturais e suas Propriedades

Produto	**Propriedades naturais**
Extrato de Propoplis	Antinflamatório, antimicrobiano, antioxidantes, cicatrizantes, antifúngica e imunomodulatoria.
Extrato de Lupulos	Antinflamatório, antimicrobiano, antioxidantes, sedativos e ansiolíticos.
Extrato de Vegetais	Antinflamatório, antioxidantes, antimicrobianos, desintoxicantes, cicatrizante e diuréticos.
Jambolao	Antinflamatório, antibacteriano, antifúngica, anticarcigoneica, antilaergica;
Pimenta Rosa	Antinflamatorio, antioxidante, antibacteriano ou anti fúngico , antisséptica;
Oregano	Antinflamatório, anticanerigeno, antimicrobiano, antioxidante;
Oléos essenciais	Antinflamatorio, anitimicrobianos, antioxidantes, cicatrizantes, antissépticos

Fonte: Autores.

METODOLOGIA

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa de natureza bibliográfica, com abordagem qualitativa, cujo objetivo foi reunir, analisar e interpretar informações provenientes de fontes secundárias, tais como artigos científicos, livros e periódicos especializados. Conforme Gil (2008), a pesquisa bibliográfica permite a construção de um referencial teórico consistente, fundamentado em conhecimentos já consolidados pela comunidade científica.

A seleção dos materiais utilizados na presente investigação baseou-se na relevância, atualidade e pertinência dos conteúdos em relação ao tema proposto: o uso de antimicrobianos em fermentações alcoólicas. As fontes consultadas foram obtidas, prioritariamente, por meio de bases de dados acadêmicas, como *Scielo, Google* Acadêmico e Periódicos Capes, abrangendo publicações entre os anos de 2010 a 2024.

A análise do material coletado foi conduzida por meio de leitura interpretativa e crítica, buscando identificar os principais pontos de convergência e divergência entre os autores quanto ao

impacto, uso e consequências da aplicação de antimicrobianos no processo de fermentação alcoólica, além de levantar possíveis alternativas e soluções para o controle microbiológico industrial.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A adoção de antimicrobianos naturais no controle microbiológico da fermentação alcoólica tem avançado significativamente nas últimas décadas. Indústrias do setor sucroenergético, especialmente no Brasil, têm buscado alternativas aos antimicrobianos sintéticos, motivadas por fatores econômicos, ambientais e regulatórios. Os estudos de caso demonstram que o uso racional de compostos naturais pode garantir um ambiente fermentativo estável, com aumento de rendimento e redução de perdas por contaminação bacteriana (Fermentec, 2021).

Um dos casos mais emblemáticos é o de uma usina localizada no interior de São Paulo, que substituiu o uso de antibióticos sintéticos por extrato de própolis padronizado durante um período experimental de três safras. Os resultados indicaram redução significativa na contagem de Lactobacillus spp. spp., sem afetar a viabilidade das leveduras (Saccharomyces cerevisiae cerevisiae) e com ganho médio de 4,2% na produtividade alcoólica (Silva *et al.,* 2020).

Outro estudo realizado pela Universidade Federal de Viçosa avaliou o uso de óleo essencial de orégano em fermentações laboratoriais contaminadas artificialmente com Lactobacillus spp. fermentum. Os resultados mostraram que concentrações entre 0,05% e 0,1% foram suficientes para inibir o crescimento bacteriano, com manutenção da atividade fermentativa das leveduras (Nascimento *et al.,* 2021).

No norte do Paraná, uma cooperativa agroindustrial iniciou testes com taninos vegetais extraídos da casca de acácia-negra (Acacia mearnsii) como alternativa a antibióticos em ciclos de fermentação contínua. Os taninos apresentaram ação bacteriostática, reduzindo a produção de ácidos orgânicos por bactérias contaminantes, além de atuarem na prevenção da formação de biofilmes nas tubulações (Barros *et al.*, 2022).

Além de aplicações diretas, muitas usinas têm investido em pesquisas próprias ou parcerias com universidades e centros de tecnologia. O Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), por exemplo, tem desenvolvido formulações compostas à base de extratos vegetais que combinam ação

antimicrobiana com propriedades antioxidantes, o que auxilia na estabilidade do processo fermentativo em condições adversas (Fermentec, 2021).

Esses estudos de caso demonstram que os antimicrobianos naturais, quando corretamente aplicados, não apenas substituem os sintéticos com eficiência, mas também podem agregar vantagens competitivas ao processo produtivo.

A produção de etanol, essencial para a matriz energética brasileira, enfrenta desafios recorrentes relacionados à contaminação bacteriana durante a fermentação alcoólica. Tradicionalmente, esse problema tem sido combatido com o uso de antimicrobianos sintéticos. No entanto, como demonstrado neste trabalho, tais práticas trazem sérias limitações (Batista & Francisqueti, 2016; Alcides, 2018).

Nesse contexto, os antimicrobianos naturais surgem como alternativas promissoras, combinando eficácia antimicrobiana com sustentabilidade ambiental. Compostos como óleos essenciais, taninos, fenólicos e bacteriocinas têm demonstrado capacidade de controlar bactérias contaminantes sem afetar o desempenho das leveduras (Silva *et al.,* 2020; Barros *et al.*, 2022; Fermentec, 2021).

Apesar dos avanços, ainda existem desafios a serem superados para a ampla adoção desses agentes naturais. Para que sua aplicação se torne viável, é fundamental que haja investimentos em pesquisa e tecnologias de extração e caracterização (Nascimento *et al.*, 2021). É necessário também que as usinas invistam em programas de monitoramento microbiológico contínuo e capacitação técnica. A integração entre ciência, indústria e políticas públicas pode acelerar a transição para processos mais limpos e sustentáveis.

O uso de antimicrobianos naturais não é apenas uma solução técnica, mas também uma resposta às demandas por responsabilidade ambiental, segurança alimentar e inovação no setor sucroenergético. Os dados indicam que o uso de compostos naturais apresenta desempenho eficaz na redução de contaminantes, com benefícios adicionais como menor geração de resíduos e maior aceitação ambiental.

A seguir, são apresentados resultados comparativos em formato será tabelado, com destaque para o desempenho de extratos como o de própolis frente às bactérias do gênero *Lactobacillus spp. spp.*, principais contaminantes do processo fermentativo.

Análise Comparativa entre Microbianos Naturais e Sintéticos

A escolha entre antimicrobianos naturais e sintéticos no controle de contaminações na produção de etanol envolve múltiplos fatores. Os antimicrobianos sintéticos têm eficácia comprovada contra uma variedade de microrganismos, porém tem como desvantagem a contaminação, podem impactar em bactérias que não são o alvo. Já os antimicrobianos naturais combatem as bactérias com maior segurança, sem deixar vestígios, mantendo inalterada a sua qualidade.

A seguir, apresenta-se uma análise comparativa com base em aspectos-chave.

Tabela – 1 Comparativo entre antimicrobianos naturais e sintéticos

Aspecto	**Naturais**	**Sintéticos**
Eficácia antimicrobiana	Alta a moderada	Alta
Risco de resistência bacteriana	Baixo	Elevado
Impacto ambiental	Reduzido	Significativo
Custo-benefício	Variável	Alto a médio
Toxicidade residual	Mínima	Moderada a alta
Origem	Renovável	Industrial

Fonte: Adaptado de Díaz Pineda *et al.* (2020).

De acordo com Lopes (2021), os antimicrobianos naturais, apesar de sua variabilidade em eficácia, apresentam-se como alternativa viável e sustentável ao controle microbiológico, sobretudo em sistemas que priorizam a ecoeficiência e a redução de resíduos químicos. Por outro lado, os antimicrobianos sintéticos oferecem ação rápida e direcionada, sendo mais indicados em casos de contaminações severas e pontuais.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de antimicrobianos naturais configura-se como uma alternativa viável, sustentável e eficiente no controle de bactérias contaminantes na produção de etanol. Além de minimizar os impactos ambientais, tais compostos contribuem para a segurança do processo industrial e a redução de resíduos químicos. O incentivo à pesquisa e à aplicação desses agentes naturais pode representar um avanço significativo rumo a uma bioindústria mais limpa e responsável.

A utilização de antimicrobianos naturais na produção de etanol é uma alternativa promissora, que alia sustentabilidade, eficácia e viabilidade econômica. Apesar de desafios como padronização de extratos e controle de dosagem, os resultados obtidos em pesquisas e aplicações práticas reforçam o potencial dessas substâncias no setor sucroalcooleiro.

A partir da revisão bibliográfica realizada, constata-se que o uso de antimicrobianos nas fermentações alcoólicas desempenha papel crucial no controle de contaminações bacterianas, especialmente por bactérias láticas, que comprometem a produtividade e a eficiência do processo fermentativo. Entretanto, a utilização contínua desses compostos demanda atenção, principalmente no que tange ao risco de desenvolvimento de cepas bacterianas resistentes e à presença de resíduos nos subprodutos da fermentação. Tais aspectos impõem a necessidade de práticas mais sustentáveis e criteriosas, que envolvam tanto a avaliação rigorosa das condições sanitárias do processo quanto a busca por alternativas antimicrobianas menos agressivas e mais específicas.

Dessa forma, torna-se evidente a importância de novas investigações voltadas para o aprimoramento de métodos de controle microbiológico na produção de etanol, de modo a conciliar eficiência industrial, segurança ambiental e responsabilidade social.

A adoção de práticas integradas, como o uso de leveduras selecionadas, a aplicação de biocidas naturais e a melhoria das condições operacionais, surge como um caminho promissor para o fortalecimento do setor sucroalcooleiro brasileiro

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). Manuais de microbiologia clínica. Brasília: Anvisa, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/anvisa/pt-br/centraisdeconteudo/publicacoes/servicosdesaude/manuais/manuais-de-microbiologia-clinica. Acesso em: 22 maio 2025.

ALCIDES, N. C. C. *Uso de antimicrobianos no controle da contaminação bacteriana na fermentação alcoólica*. 2018. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP).

ASSIS, L. M. *et al.* Controle microbiológico na indústria sucroalcooleira. *Revista Brasileira de Biotecnologia,* v. 10, n. 2, p. 23-35, 2022.

BARROS, A. L. *et al.* Eficácia de compostos naturais no controle de contaminações bacterianas. *Revista Brasileira de Agroenergia*, v. 32, n. 2, p. 67-80, 2022.

BATISTA, A. R.; FRANCISQUETI, E. L. *Estudo da ação de antimicrobianos químicos frente a bactérias contaminantes de mosto na produção de etanol*. 2016. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP).

BILLERBECK, G. M.; LAJOLO, F. M. Compostos naturais como antimicrobianos. *Revista de Biotecnologia,* v. 32, n. 2, p. 45-52, 2016.

BIOBLOG. Diferenças entre o combustível fóssil e o biocombustível. Disponível em: http://www.bioblog.com.br/diferencas-entre-o-combustivel-fossil-e-o-biocombustivel. Acesso em: 07 abr. 2025.

BRESSANI, R.; LADEIRA, L**.** Controle microbiológico em fermentações industriais. *Revista Brasileira de Agroenergia,* v. 29, n. 4, 2019.

ERNANDES, F. M. P. G.; GARCIA-CRUZ, C. H. Zymomonas mobilis: um microrganismo promissor para a fermentação alcoólica. *Semina:* Ciências Agrárias, Londrina, v. 30, n. 4, p. 889–908.

FERMENTEC. Antimicrobianos naturais: controle da contaminação bacteriana sem impacto ambiental. 2021.

FERREIRA, J. A.; LIMA, P. R. Antimicrobianos naturais na fermentação alcoólica: desafios e perspectivas. *Bioenergia em Foco*, v. 5, n. 1, p. 44-58, 2021.

FREITAS, D. F.; ROMANO, C. C. Contaminação bacteriana na fermentação alcoólica. *Revista Brasileira de Microbiologia,* v. 46, n. 1, p. 23-30, 2015.

GARCIA, R. A. *Avaliação da floculação em processos fermentativos com Saccharomyces cerevisiae*. 2000. Dissertação (Mestrado em Microbiologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

GIL, A. C. *Como elaborar projetos de pesquisa*. São Paulo: Atlas, 2008.

LOPES, M. P. Aplicação de extratos vegetais como biocidas naturais. *Revista Científica de Engenharia Bioquímica*, 2021.

MOREIRA, V. S. *Alternativas naturais ao controle de bactérias em destilarias*. 2020. Dissertação (Mestrado em Microbiologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

NASCIMENTO, V. S. *et al.* Aplicação de antimicrobianos naturais na fermentação alcoólica. *Revista de Biotecnologia,* v. 15, n. 3, p. 45-58, 2021.

SILVA, A. M. *et al.* Parâmetros críticos da fermentação alcoólica. *Anais da Semana de Biotecnologia*, 2018.

SILVA, M. F. *Compostos bioativos de origem vegetal com potencial antimicrobiano*. São Paulo: Ed. Ciência Viva, 2020.

1 COLI, Dirlei Augusto de Oliveira. Graduação em Tecnologia em Biocombustíveis pela FATEC Piracicaba Dep. "Roque Trevisan" – Centro Estadual de Educação Tecnológica "Paula Souza" – CEETEPS.

2 PRADA, Marcos Henrique. Experiência de 21 anos em Produção e Manutenção de Indústria Sucroalcooleira no Processo de Produção de Etanol e Espcecilista em Fermentação Alcoólica, Professor da FATEP (Faculdade de Teconologia de Piracicaba, dos curso de Produção industrial e Sucroalcooleira) e Professor do ISCA (Instituto Superior de Ciências Aplicadas) no curso de Biocombustíveis e Açúcar e Álcool até 2014. Atualmente Professor Assistente I da FATEC (Faculdade de Tecnologia de Piracicaba) no curso de Biocombustíveis como Especialista em Manutenção Industrial e no Curso Superior de Agroindústria/Alimentos como professor de Fermentações Industriais; graduado em Licenciatura em Ciências Biológicas pela Universidade Metodista de Piracicaba (2004). Tenho experiência de 21 anos com ênfase em Manutenção Industrial na indústria Sucroalcooleira.

Recuperação de invertase através do sistema de duas fases aquosas

RODRIGUES, Eliana Maria Gonçalves

Resumo

A enzima invertase apresenta um forte apelo comercial devido a sua finalidade de catalisar a hidrólise da sacarose em glicose e frutose. Podendo ser aplicada em diversas indústrias como a de cosméticos, medicamentos, papel, alimentos e bebidas. Entretanto, um dos grandes desafios consiste em utilizar as enzimas em diferentes setores da indústria sem que seja necessário empregar métodos com custos elevados na sua produção e recuperação, uma vez que, os métodos convencionais para purificar biomoléculas geralmente incluem etapas muito complexas. Sendo assim, uma alternativa viável é extrair a molécula de interesse através de um sistema de duas fases aquosas. É neste sentido, que o presente trabalho tem o intuito de propor um método de recuperação para a enzima invertase a partir da utilização de um sistema de duas fases aquosa, tendo em vista simplicidade de execução, baixo custo e a alta seletividade. A metodologia proposta se baseia na obtenção invertase a partir da levedura *Saccharomyces cerevisiae*, na utilização do sistema de duas fases aquosa formada por um polímero e sal, na determinação da atividade da invertase pela concentração de açúcares redutores produzidos após o tempo de ensaio e a quantificação de açúcares redutores liberados será estimada pelo método do ácido dinitrosalicílico (DNS) e análise dos resultados através do Programa *Statistix* 10 e construção do gráfico de superfície de resposta pelo Programa *Minitab Statistical Software*. Os resultados das análises demonstram que a variável pH e o modelo são significativos, podendo o modelo ser representado por um linear, além de não apresentar falta de ajuste. Os melhores resultados para a recuperação em atividade enzimática da invertase foram obtidos quando se trabalhou com a concentração de 30% (p/p) para o PEG_{6000} e 15% (p/p) para o $MgSO_4$ no pH 7,0, alcançando um valor máximo de 84,5%.

Palavras-chave: Enzima. *Saccharomyces cerevisiae*. Polietileno Glicol (PEG). Extração Líquido-Líquido.

Abstract

The invertase enzyme has a strong commercial appeal due to its purpose of catalyzing the hydrolysis of sucrose into glucose and fructose. It can be applied in several industries such as cosmetics, medicines, paper, food and beverages. However, one of the great challenges is to use the enzymes in different sectors of the industry without having to employ costly methods for their production and recovery, since conventional methods for purifying biomolecules generally include very complex steps. Therefore, a viable alternative is to extract the molecule of interest through an aqueous two-phase system. It is in this sense that the present work aims to propose a recovery method for the invertase enzyme using an aqueous two-phase system, taking into account simplicity of execution, low cost and high selectivity. The proposed methodology is based on obtaining invertase from the yeast *Saccharomyces cerevisiae*, using the aqueous two-phase system formed by a polymer and salt, determining the invertase activity by the concentration of reducing sugars produced after the test time and the quantification of reducing sugars released will be estimated by the dinitrosalicylic acid (DNS) method and analysis of the results through the Statistix 10 program and construction of the response surface graph by the Minitab Statistical Software

program. The results of the analyses demonstrate that the pH variable and the model are significant, and the model can be represented by a linear model, in addition to not presenting lack of adjustment. The best results for the recovery of invertase enzymatic activity were obtained when working with the concentration of 30% (w/w) for PEG6000 and 15% (w/w) for $MgSO_4$ at pH 7.0, reaching a maximum value of 84.5%.

Keywords: Enzyme. *Saccharomyces cerevisiae.* Polyethylene Glycol (PEG). Liquid-Liquid Extraction.

Resumen

La enzima invertasa tiene un fuerte atractivo comercial debido a su propósito de catalizar la hidrólisis de la sacarosa en glucosa y fructosa. Se puede aplicar en diversas industrias como cosméticos, medicamentos, papel, alimentos y bebidas. Sin embargo, uno de los grandes retos es utilizar enzimas en diferentes sectores de la industria sin necesidad de emplear métodos costosos en su producción y recuperación, ya que los métodos convencionales para purificar biomoléculas suelen incluir pasos muy complejos. Por lo tanto, una alternativa viable es extraer la molécula de interés a través de un sistema acuoso de dos fases. Es en este sentido que el presente trabajo tiene como objetivo proponer un método de recuperación de la enzima invertasa a partir del uso de un sistema acuoso de dos fases, en vista de la simplicidad de ejecución, bajo costo y alta selectividad. La metodología propuesta se basa en la obtención de invertasa a partir de la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, en el uso del sistema acuoso bifásico formado por un polímero y sal, en la determinación de la actividad invertasa por la concentración de azúcares reductores producidos después del tiempo de ensayo y la cuantificación de los azúcares reductores liberados se estimará por el método del ácido dinitrosalicílico (DNS) y el análisis de los resultados a través del Programa Statistix 10 y construcción del gráfico de superficie respuesta del Programa de Software Estadístico de Minitab. Los resultados de los análisis demuestran que la variable pH y el modelo son significativos, y el modelo puede ser representado por uno lineal, además de no presentar falta de ajuste. Los mejores resultados para la recuperación en la actividad enzimática de la invertasa se obtuvieron al trabajar con la concentración de 30% (p/p) para PEG6000 y 15% (p/p) para $MgSO_4$ a pH 7.0, alcanzando un valor máximo de 84.5%.

Palabras clave: Enzima. *Saccharomyces cerevisiae.* Polietilenglicol (PEG). Extracción líquido-líquido.

INTRODUÇÃO

O processo de extração líquido-líquido apresenta-se como uma opção atrativa para a separação de biomoléculas, sendo o sistema de duas fases aquosa, constituídos por uma mistura aquosa de um polímero com sal orgânico, ou por dois polímeros hidrofílicos ou por separação de fases por indução de temperatura de um detergente não iônico (Zielińska-Dawidziak e Michalak, 2019). A formação de fases ocorre devido ao tipo de componente envolvido; devido a variação de concentração de uma das fases; variação de pH ou temperatura e por gradiente de força iônica (Raja *et al.*, 2011). As vantagens na sua utilização envolvem baixo tempo de processo e consumo energético, altos rendimentos, facilidade de aumento de escala operacional de um nível laboratorial para industrial e a possibilidade de se operar em um processo contínuo (Zielińska-Dawidziak e Michalak, 2019). Além disso, possui aplicações em diversos setores industriais, como no setor alimentício, na extração de compostos fenólicos em subprodutos do café, na extração de ácido lático e para produção de corantes alimentícios sintéticos (Smirnova *et al.*, 2021; Beg *et al.*, 2022; Bondam *et al.*, 2022; Chen *et al.*, 2022).

O polietileno glicol (PEG) é um polímero sintético, não carregado, de cadeia linear de unidades de oxietileno que apresenta alta solubilidade em água, baixa pressão de vapor, não inflamável, não corrosivo e nem tóxico, além de ser aprovado pela FDA para uso em fármacos e alimentos (Liu *et al.*, 2014). Geralmente quase todas as biomoléculas menores tendem migrar para a fase inferior (fase sal) que é mais polar e as proteínas permanecem na fase superior (fase PEG) menos polar. Além, do sistema de duas fases aquosa, poder atuar como um processo de pré-purificação, uma vez que promove a redução de grande quantidade de contaminantes, auxiliando no aumento do rendimento em processos mais onerosos de purificação (Phong *et al.*, 2018).

Algumas características que promovem a separação das fases é a diferença de densidade, o valor do pH, da temperatura, da força iônica e os tipos de componentes do sistema e suas interações (Raja *et al.*, 2011; Passos *et al.*, 2013; Shi *et al.*, 2021). O PEG é um dos polímeros mais utilizados como componente de um sistema aquoso bifásico, devido às suas propriedades físicas, seu baixo custo e flexibilidade de formação de sistema de duas fases aquosa com diversos outros polímeros e sais. Entre suas características relacionadas com sua estrutura química promovem a formação de pontes de hidrogênio com as moléculas de água, ocasionando em uma fina camada de água em volta da molécula de PEG. Assim, moléculas de proteínas que se quer extrair, por também possuírem uma camada de moléculas de água ao seu redor irão interagir com o PEG, devido à interação por pontes de hidrogênio (Raja *et al.*, 2011; Kozlowska *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2021).

Vários estudos demonstram a recuperação de proteínas através da utilização do sistema de duas fases aquosa, utilizando uma única proteína ou múltiplas proteínas como moléculas-alvo. Por exemplo, Pedro *et al.* (2021) estudaram a partição de BSA em sistema de duas fases aquosa (SDFA) de PEG com fosfato de potássio, utilizando com PEGs de diferentes massas moleculares e Santos *et al.* (2020) pesquisaram sobre a partição de enzima amilase produzida por *Aspergillus niger* em SDFA composto por polietilenoglicol e sulfato de lítio, sulfato de amônio e sulfato de sódio.

Enzimas são moléculas capazes de acelerar os processos químicos com grandes vantagens, frente aos catalisadores químicos, principalmente por serem ecologicamente mais viáveis. A cada dia presencia-se mais processos industriais que utilizam enzimas como catalisadores, dentre as quais se destacam enzimas na área de alimentos, saúde humana e animal e bens como papel e indústria têxtil (Monteiro e Silva, 2009). Embora as enzimas sejam utilizadas na indústria de alimentos por terem as propriedades de inocuidade, eficiência e adequação às matérias-primas utilizadas, apenas poucas variedades de enzimas, na maioria hidrolases, são usadas em grande escala.

A invertase ou β-D-frutofuranosidase (E.C.3.2.1.26) é uma glicoproteína, que produz uma forma intracelular mais leve de 135 kDa e outra extracelular mais pesada, contendo uma porção importante de carboidratos, glicoproteína, de 270 kDa. Possui um pH isoelétrico de 4, apresenta um máximo de atividade catalítica em pH de 4,5 e estável termicamente a 50°C, com máxima atividade a 55°C (Kermasha e Eskin, 2021). Seu principal substrato é a sacarose, resultando da sua hidrólise uma molécula de glicose e outra de frutose (Fiedurek *et al.*, 2000).

São encontradas na natureza em microrganismos e plantas, principalmente na aveia, ervilha, cana-de-açúcar e microrganismos, tais como *Aspergillus* sp. e *Saccharomyces cerevisiae* (Kulshrestha *et al.*, 2013; Bhalla *et al.*, 2017). A principal fonte de invertase industrial são as leveduras, sendo 80% das enzimas extracelulares e 20% intracelulares. Apresentam atividade catalítica similares, mas composição de aminoácidos diferentes. A invertase externa possui cisteína e a interna não (Isik *et al.*, 2003; Vicente, 2000). Dentre suas características destacam-se sua estabilidade térmica contra calor e o seu comportamento termodinâmico, sendo muito importantes para aplicações alimentícias que incluem etapas com altas temperaturas, com um tempo de meia-vida de 224 min em 55°C (Manoochehri *et al.*, 2020). De acordo com Cabral (2012), as invertases provindas de leveduras para fins industriais podem operar em condições ótimas de pH variando de 3,5 até 5,5, sua atividade enzimática específica média é entre 2700 e 2900 U/mg de proteína se for extracelular e intercelular, respectivamente, e a constante de Michaelis Menten (Km) em torno de 25 mM.

A hidrólise da sacarose pela invertase é importante, pois explica a utilização das invertases nas indústrias de cosméticos, de medicamentos, de papel, de alimentos e de bebidas, principalmente na produção de xarope de açúcar invertido de sacarose e em substratos de sacarose para

fermentação com a finalidade de produção de bebidas alcoólicas, glicerol e ácido lático. Industrialmente, as invertases têm seu maior campo de aplicação na área de alimentos, tanto na fabricação de mel artificial, quanto para a produção dos frutooligossacarídeos (Padilha *et al.*, 2017; Chan *et al.*, 2020). O açúcar invertido, é amplamente utilizado na panificação, na formulação de cremes para recheio e de geleias especialmente na preparação de balas, doces e xaropes (Gracida-Rodríguez *et al.*, 2005; Said e Pietro, 2004). No processo de fabricação de xaropes, sua utilização apresenta vantagens significativas, uma vez que não forma subprodutos (Swain e Stephan, 2005). A sua principal aplicação na indústria alimentícia é explicada pela frutose ter maior poder adoçante do que a sacarose, além do fenômeno da cristalização acontecer de forma mais lenta, produzindo produtos mais frescos e com as propriedades físicas estáveis (Akardere *et al.*, 2010; Valerio *et al.*, 2013).

É importante ressaltar que, no setor alimentício e de bebidas, há uma grande expansão do mercado, chegando a movimentar 6,4 bilhões de dólares em 2021 de acordo com pesquisa do Business Communication Company (BCC) e com uma projeção de crescimento anual de 6,3% por ano, chegando a 8,7 bilhões de dólares em 2026 (BCC RESEARCH, 2021). Esse comportamento é devido à necessidade que as indústrias alimentícias e de bebidas possuem no processamento de açúcares e na produção de probióticos, produtos livres de lactose, antioxidantes e ômega 3 (Basso e Serban, 2019).

Deste modo, este trabalho teve por objetivo estudar a recuperação da enzima invertase obtida através da levedura *Saccharomyces cerevisiae*, mediante a utilização de um sistema de duas fases aquosas composto por PEG e $MgSO_4$.

1. METODOLOGIA

1.1 Obtenção da invertase

A invertase foi obtida a partir da levedura *Saccharomyces cerevisiae*. Foi pesado 50 gramas de levedura seca, depois suspender em 250mL de bicarbonato de sódio 0,15M e manter em banho-maria a 37ºC durante 6 horas, com agitação ocasional. Centrifugar por 20 minutos a 3500rpm. Coletar o sobrenadante, o qual contém a enzima invertase ativa. Conservar em freezer.

1.2 Determinação da atividade enzimática

Em um tubo, colocar 1,0 mL da solução contendo invertase e 1,0 mL de solução tamponada de sacarose 0,3M (tampão acetato 0,05 M; pH 4,6). Misturar e deixar o tubo em banho-maria a 37ºC por 10 minutos. A seguir, adicionar 1,0 mL de solução de ácido dinitrosalicílico, mergulhando o tubo em banho fervente por 5 minutos. Resfriar e completar o volume a 10 mL

com água destilada e fazer as leituras em espectrofotômetro em 540 nm. Para preparar o branco, substituir a solução da enzima por água destilada. A quantificação de açúcares redutores liberados foi estimada pelo método do ácido dinitrosalicílico (DNS) conforme Miller (1959). Em seguida foi realizada a leitura em 540nm usando um espectrofotômetro UV-Vis. Uma unidade (U) de atividade de invertase foi definida como a quantidade de enzima capaz de liberar 1mmol de grupos redutores, medidos como glicose, por minuto, nas condições de reação utilizadas.

1.3 Determinação das Linhas de Amarração

As curvas binodais foram determinadas através do método de titulação (Bamberger *et al.*, 1985; Vernau *et al.*, 1990).

1.4 Delineamento Experimental da Recuperação da Amilase Através do SDFA

Para o estudo da recuperação da invertase foi proposto um delineamento experimental para verificação das variáveis que influenciam sobre a recuperação da invertase através do sistema de duas fases aquosas composto por PEG/sulfato de magnésio foi realizado segundo um esquema fatorial completo do tipo 2^3 com 2 ensaios no ponto central. As variáveis utilizadas foram: concentração de PEG/$MgSO_4$ (A), pH (B) e Massa Molar do PEG (C). A matriz utilizada está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Matriz do planejamento fatorial completo 2^3 com 2 ensaios no ponto central

Ensaios	A	B	C
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1
9	0	0	0
10	0	0	0

A = Concentração de PEG/$MgSO_4$ (%) (p/p) (-1 = 15/30; ;0 = 22,5/22,5,0;1 =30/15); B = pH (-1 = 4,0; 0 = 5,0; 1 = 6,0); C = MM PEG (g/mol) (-1 = 1500; 0 = 4000; 1 = 6000)

1.5 Planejamento Experimental

A análise estatística dos resultados foi realizada através do Programa *Statistix* 10, onde foram feitas estimativas dos efeitos das variáveis, considerando um nível de significância de 95%. Os resultados foram expressos em tabelas de estimativa de efeitos, teste t de "Student" e ainda em tabelas de análise de variância. E o gráfico de superfície de resposta foi obtido através do Programa *Minitab Statistical Software.*

1.6 Metodologia de análise dos resultados

Para a avaliação do processo de recuperação da invertase foi analisado a recuperação em atividade enzimática (R_{AE}).

$$R_{AE} = A_2/A_1 \times 100$$

A_2 = atividade da enzima na fase extraída

A_1 = atividade da enzima antes da extração

As atividades A_1 e A_2 correspondem à atividade enzimática multiplicada pelo volume da fase considerada.

2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

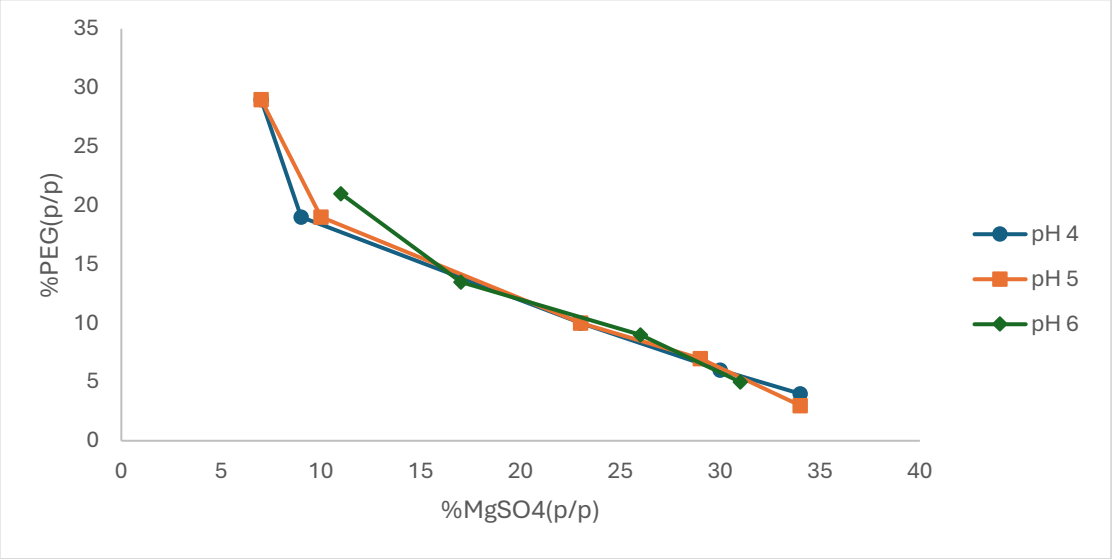
2.1 Determinação dos Diagramas de Fases PEG/$MgSO_4$/Invertase

O estudo do diagrama de fases visa conhecer o comportamento da enzima no sistema de duas fases aquosas. Uma vez que, a curva binodal demarca a região em que o sistema deixa de ser monofásico e passa a ser bifásico. Composições localizadas na região abaixo da curva formam sistemas com uma fase, enquanto na região acima, formam sistemas com duas fases.

Nas Fig. 1, 2 e 3, estão representados os diagramas de fases referentes aos PEGs com diferentes massas moleculares e valores de pHs utilizando a enzima invertase, obtida através da levedura *Saccharomyces cerevisiae*. Sendo observado que não houve um deslocamento significativo da binodal em relação aos diferentes valores de pH estudados, assim como sua pouca influência nas composições das linhas de amarração.

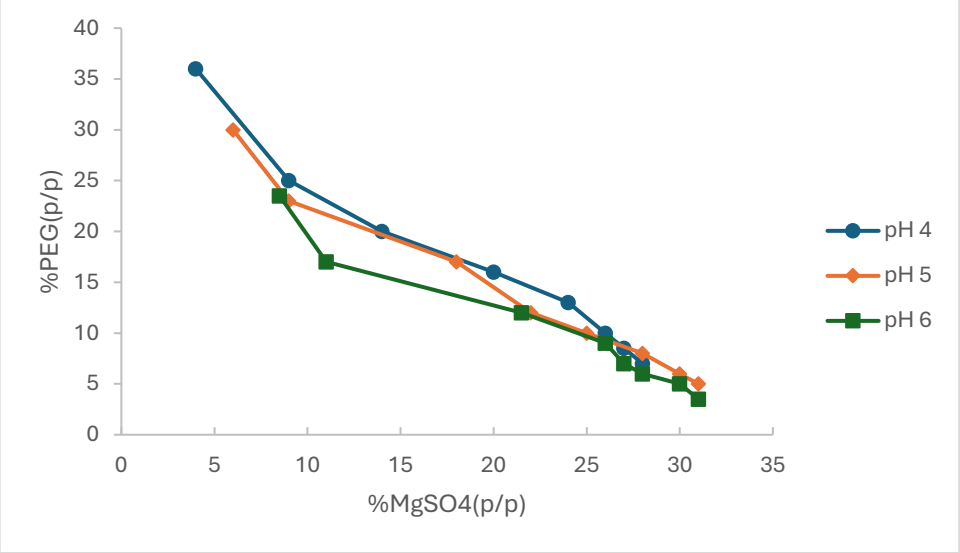
Com estes resultados pode-se perceber, que a influência do pH não apresentou um comportamento esperado, que era o deslocamento mais significativo das curvas, o mesmo resultado foi constatado por Ferreira *et al.* (2009).

Figura 1: Diagrama de fases do sistema de duas fases aquosas PEG 1500/$MgSO_4$/Invertase em diferentes valores de pH



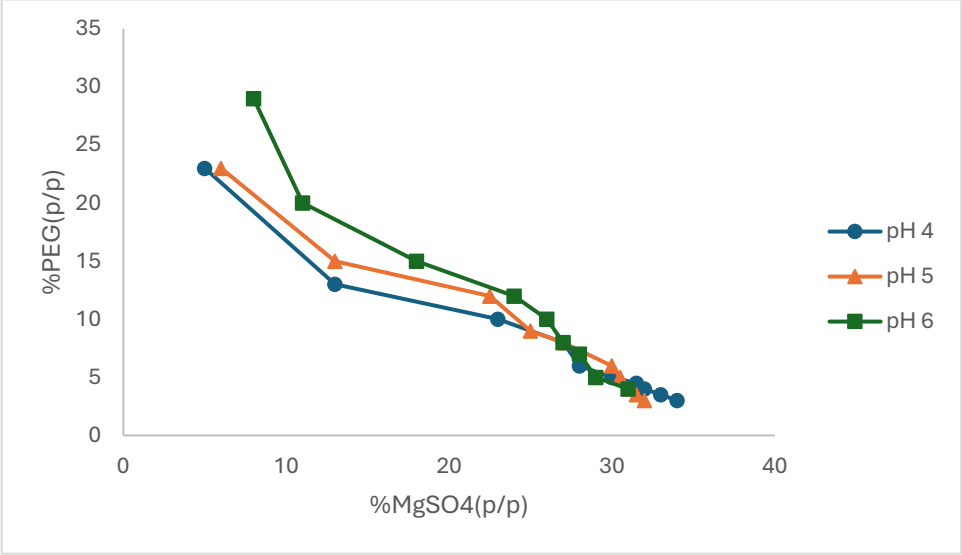
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 2: Diagrama de fases do sistema de duas fases aquosas PEG 4000/$MgSO_4$/Invertase em diferentes valores de pH.



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 3: Diagrama de fases do sistema de duas fases aquosas PEG 6000/$MgSO_4$/Invertase em diferentes valores de pH



Fonte: Dados da pesquisa.

A partir de agora serão feitos ensaios de recuperação da invertase pelo sistema de duas fases aquosas, utilizando PEG/$MgSO_4$ em diferentes concentrações, pHs e massas moleculares de PEG.

2.2 Recuperação da Invertase pelo Sistema de Duas Fases Aquosas Composto por PEG/Sulfato de Magnésio

Visando a recuperação da invertase, por meio de um sistema de duas fases aquosas, utilizou-se o polietilenoglicol (PEG) em diferentes massas molares, sua escolha se deve à boa eficiência do mesmo de formar fases em meio aquoso e não provocar a diminuição da atividade enzimática, além de ser biodegradável e atóxico. Além do PEG foi utilizado o sulfato de magnésio, uma vez que o $MgSO_4$ apresentou bons resultados na recuperação da invertase no sistema de duas fases aquosas (Carvalho, 2022). Além disso, o sulfato de magnésio é um sal neutro e o PEG é um polímero que possui baixa tendência de dissociação, formando assim uma boa combinação para a formação de um sistema aquoso bifásico (Carvalho, 2022; Zielińska-Dawidziak e Michalak, 2019; Wysoczanska *et al.*, 2015). Grande parte dos trabalhos de recuperação de invertase, obtida através da levedura *S. cerevisiae*, que utilizam o sistema de duas fases aquosas trabalham no pH em torno de 5,0, o que garante a estabilidade da atividade enzimática (Karkaş e Önal, 2012; Madhusudhan e Raghavarao, 2011). Foi utilizado um planejamento experimental, com as seguintes variáveis: porcentagem de PEG/$MgSO_4$, pH e Massa Molecular do PEG. As condições experimentais de cada ensaio,

juntamente com os resultados de recuperação em atividade enzimática, são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Esquema da matriz utilizada no planejamento fatorial completo 2^3 com 2 ensaios no ponto central e os resultados em Recuperação em Atividade Enzimática utilizando o sistema PEG/$MgSO_4$

Ensaios	A	B	C	R_{AE}(%)
1	-1	-1	-1	33,2
2	+1	-1	-1	49,9
3	-1	+1	-1	43,4
4	+1	+1	-1	66,0
5	-1	-1	+1	50,0
6	+1	-1	+1	67,8
7	-1	+1	+1	44,7
8	+1	+1	+1	84,5
9	0	0	0	64,9
10	0	0	0	64,1

A = Concentração de PEG/$MgSO_4$ (%) (p/p) (-1 = 15/30; ;0 = 22,5/22,5;1 =30/15); B = pH (-1 = 4,0; 0 = 5,0; 1 = 6,0); C = Massa Molar PEG (g/mol) (-1 = 1500; 0 = 4000; 1 = 6000)

Ao analisar os resultados da Tabela 2, percebe-se que o maior e o menor rendimento em atividade da enzima são encontrados nos ensaios 8 e 1, justamente onde temos as variáveis no maior e menor valor, respectivamente.

Através dos resultados estatísticos (Tabelas 3 e 4), foi possível constatar que a variável pH e o modelo são significativos, podendo o modelo ser representado por um linear, além de não apresentar falta de ajuste.

TABELA 3: Efeitos estimados, valores do teste t de "Student" obtidos no planejamento fatorial completo 2^3 com 2 ensaios no ponto central

Efeitos	Estimativas	T	P
Média	56,85	23,6758	0,0000*
A	12,1125	4,5118	0,0040*
B	4,7125	1,7553	0,1297
C	6,8125	2,5376	0,0442

A = Concentração de PEG/$MgSO_4$ (%); B = pH; C = Massa Molar PEG (g/mol) *Significativos ao nível de 95% de confiança

TABELA 4: Análise da variância para o estudo da recuperação de amilase por sistema de duas fases aquosas, no planejamento fatorial completo 2^3 com 2 ensaios no ponto central

	SQ	Df	MQ	F	P
Modelo	1722,64	3	574,215	9,96	0,0096*
Resíduo	345,94	6	57,6569		
Total	2068,59	9			
Falta de ajuste	345,62	5	69,1243	216,01	0,0516

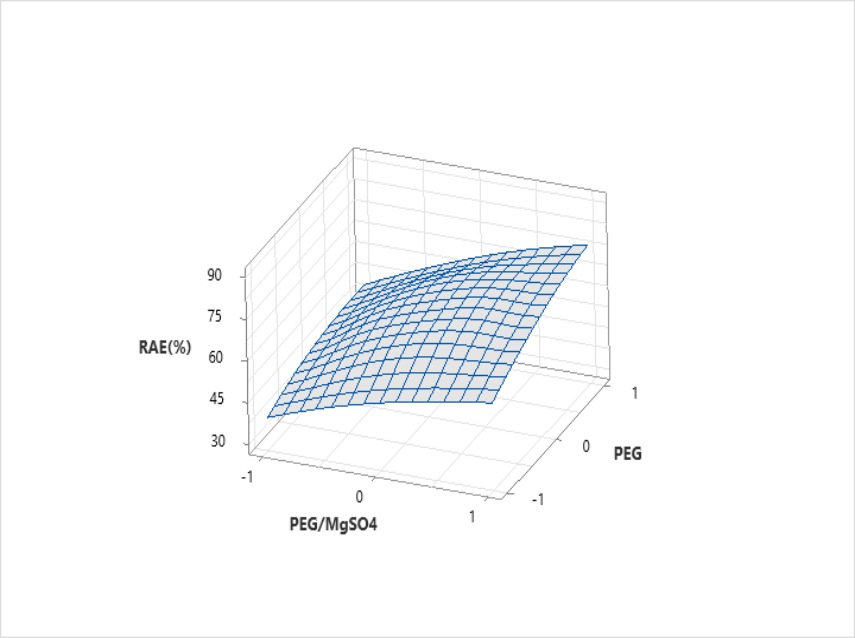
R^2 = 0,83; SQ = Soma Quadrática; QM = Média Quadrática; *Significativos ao nível de 95% de confiança

Sendo assim, podemos representar o processo de recuperação da invertase por um sistema de duas fases aquosas, considerando os termos que realmente influenciam no rendimento em atividade, pela Equação 1:

$$Y = 56,85 + 12,11*A \qquad (1)$$

Sendo que Y representa o recuperação em atividade enzimática e A a concentração PEG/$MgSO_4$. A superfície de resposta do modelo e as linhas de contorno estão apresentadas na Figura 4.

Figura 4: Superfície de resposta descrita pelo modelo da Equação 1, que representa a recuperação da invertase por um sistema de duas fases aquosas



CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que, o sistema de duas fases aquosa pode ser uma alternativa para a recuperação e concentração das enzimas, pois dentro dos limites estipulados, através da utilização do planejamento experimental, o modelo não apresentou falta de ajuste, sendo representado por um modelo linear, tendo como variável significativa a concentração de PEG/$MgSO_4$, alcançando um valor máximo de 84,5% para a recuperação em atividade enzimática da invertase nas concentrações de PEG_{6000} 30% (p/p) e $MgSO_4$ 15%(p/p) e pH 7,0.

REFERÊNCIAS

AKARDERE, E.; ÖZER, B.; ÇELEM, E. B.; ÖNAL, S. Three-phase partitioning of invertase from Baker's yeast. *Separation and Purification Technology*, v. 72, n. 3, p. 335-339, 2010.

BAMBERGER, S., BROOKS, D.E., SHARP, K.A., ALSTINE, J.M.V., WEBBER, T. J. Preparation of phase systems and measurement of their physicochemical properties. *In*: WALTER, H., BROOKS, D.E., FISHER, D. *Partitioning in aqueous two-phase systems: theory, methods, uses and applications to biotechnology*. Orlando: Academic Press, 1985, p.85-130.

BASSO, A.; SERBAN, S. Industrial applications of immobilized enzymes—A review. *Molecular Catalysis*, v. 479, p. 110607, 2019.

BCC RESEARCH. *Global Markets for Enzymes in Industrial Applications*; BCC Publishing: Wellesly, MA, USA, 2021.

BEG, D.; KUMAR, A.; SHENDE, D.; WASEWAR, K. Liquid-liquid extraction of lactic acid using non-toxic solvents. *Chemical Data Collections*, p. 100823, 2022.

BHALLA, T. C.; BANSULI; THAKUR N.; SAVITRI; THAKUR, N. Invertase of *Saccharomyces cerevisiae* SAA-612: Production, characterization and application in synthesis of fructo-oligosaccharides. *LWT*, v. 77, p. 178-185, 2017.

BONDAM, A. F.; SILVEIRA, D. D.; SANTOS, J. P. dos; HOFFMANN, J. F. Phenolic compounds from coffee by-products: extraction and application in the food and pharmaceutical industries. *Trends In Food Science & Technology*, v. 123, p. 172-186, 2022.

CABRAL, B. V. *Hidrólise de sacarose por invertase imobilizada em duolite A-568 por adsorção e ligação cruzada*. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

CARVALHO, Júlia Caroline Ribeiro de. *Recuperação e purificação de invertases de Saccharomyces cerevisiae usando sistema aquoso bifásico PEG 1500/sulfato de magnésio em microcanais*. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Natal, RN, 2022. 97 f.

CHAN, W. D.; HICKS, B.; KALIAPPAN, A.; GARBETT, N. C.; HANSEN, L. D.; KENEALEY, J. D. Employing calorimetric methods to determine the mechanism of the invertase maximal activity delay. *ACS Food Science & Technology*, v. 1, n. 1, p. 60-65, 2020.

CHEN, J.; ZHOU, C.; XIE, B.; ZHANG, J. Simulation of the enhancement of Dean flow on the liquid–liquid extraction in membrane contactors. *Separation and Purification Technology*, v. 285, p. 120-384, 2022.

FERREIRA, J. F.; PADILHA, G. da SILVA; TAMBOURGI, E. B. Efeitos da massa molar e do pH sobre o equilíbrio termodinâmico do sistema bifásico aquoso PEG/fosfatos. *Exata,* São Paulo, v. 7, n. 1, p. 49-56, 2009.

FIEDUREK, J.; PIELECKI, J.; SKOWRONEK, M. Direct methods for selecting mutants with increased production of invertase from mutagenised cultures *of Aspergillus fumigatus*. *Journal of Basic Microbiology,* v. 40, p. 111-118, 2000.

GRACIDA-RODRÍGUEZ, J.; FAVELA-TORRES, E.; PRADO-BARRAGÁN, A.; HUERTAOCHOA, S. SAUCEDO-CASTAÑEDA, G. Invertases. *In*: PANDEY, A.; WEBB, C.; SOCCOL, C.R.; LARROCHE, C. (ed.) *Enzyme Technology*. New Delhi: Asiatech Publishers, 2005. p. 449-464.

ISIK, S.; ALKAN, S.; TOPPARE, L.; CIANGA, I.; YAGCI, Y. Immunobilization of invertase and glucose oxidase in poly 2-methylbutyl-2-(3-thienyl) acetate/polypyrole matrices. *European Polymer Journal,* v. 39, p. 2375-2381, 2003.

KARKAŞ, Taylan; ÖNAL, Seçil. Characteristics of invertase partitioned in poly (ethyleneglycol)/magnesium sulfate aqueous two-phase system. *Biochemical Engineering Journal*, v. 60, p. 142-150, 2012.

KERMASHA, S.; ESKIN, M. N.A. Selected industrial enzymes. *Enzymes*, p. 259- 305, 2021. Elsevier.

KOZLOWSKA, M.; GOCLON, J.; RODZIEWICZ, P. Intramolecular hydrogen bonds in low-molecular-weight polyethylene glycol. *ChemPhysChem*, v. 17, n. 8, p. 1143-1153, 2016.

KULSHRESTHA, S.; TYAGI, P.; SINDHI, V.; YADAVILLI, K. S. Invertase and its applications–a brief review. *Journal of Pharmacy Research*, v. 7, n. 9, p. 792-797, 2013.

LI, K.; QI, Y.; ZHOU, Y.; SUN, X.; ZHANG, Z. Microstructure and properties of poly (ethylene glycol)-segmented polyurethane antifouling coatings after immersion in seawater. *Polymers*, v. 13, n. 4, p. 573, 2021.

LIU, W.; LIU, J.P.; ZOU, L.Q.; ZHANG, Z-Q.; LIU, C-M.; LIANG, R-H.; XIE, M-Y.; WAN, J. Stability and conformational change of methoxypolyethylene glycol modification for native and unfolded trypsin. *Food Chemistry*, v. 146, p. 278-283, 2014.

MADHUSUDHAN, M. C.; RAGHAVARAO, K. S. M. S. Aqueous two phase extraction of invertase from baker's yeast: Effect of process parameters on partitioning**.** *Process Biochemistry*, v. 46, n. 10, p. 2014-2020, 2011.

MANOOCHEHRI, H.; HOSSEINI, N. F.; SAIDIJAM, M.; TAHERI, M.; REZAEE, H.; NOURI, F. A review on invertase: Its potentials and applications. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, v. 25, p. 101599, 2020.

MILLER, G.L. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Analytical Chemistry*, v. 31, n. 3, p. 426-428, 1959.

MONTEIRO, V. N., SILVA, R. N. Aplicações Industriais da Biotecnologia Enzimática. *Revista Processos Químicos,* v. 3, n. 5, p. 9-23, 2009.

PADILHA, C. E. A.; OLIVEIRA JÚNIOR, S. D.; SOUZA, D. F. S.; OLIVEIRA, J. A.; MACEDO, G. R.; SANTOS, E. S. Partition coefficient prediction of Baker's yeast invertase in aqueous two phase systems using hybrid group method data handling neural network. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, v. 25, n. 5, p. 652-657, 2017.

PASSOS, H.; TRINDADE, M. P.; VAZ, T. S.; COSTA, L. P.; FREIRE, M. G.; COUTINHO, J. A. The impact of self-aggregation on the extraction of biomolecules in ionic-liquid-based aqueous two-phase systems. *Separation and Purification Technology*, v. 108, p. 174-180, 2013.

PEDRO, M. S.; OLIVEIRA, L. A. F.; PADILHA, C. E. A.; SANTOS, E. S.; OLIVEIRA, J. A.; SOUZA, D. F. S. Effect of flow patterns on bovine serum albumin and ampicillin partitioning using aqueous two-phase systems in microdevice. *Separation and Purification Technology*, v. 254, p. 117592, 2021.

PHONG, W. N.; SHOW, P. L.; CHOW, Y. H.; LING, T. C. Recovery of biotechnological products using aqueous two-phase systems. *Journal of bioscience and bioengineering*, v. 126, n. 3, p. 273-281, 2018.

RAJA, S.; MURTY, V. R.; THIVAHARAN, V.; RAJASEKAR, V.; RAMESH, V. Aqueous two phase systems for the recovery of biomolecules–a review**.** *Science and Technology*, v. 1, n. 1, p. 7-16, 2011.

SAID, S., PIETRO, R. C. L. R. *Enzimas como agentes biotecnológicos*. Ribeirão Preto: Faculdade de Ciências Farmacêuticas de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo. 2004.

SANTOS, K. A.; FONTAN, R. D. C. I.; SANTOS, L. S.; BATISTA, I. C.; GANDOLFI, O. R. R.; CASTRO, S. S.; BONOMO, R. C. F. Partitioning of amylase produced by *Aspergillus niger* in solid state fermentation using aqueous two-phase systems. *Process Biochemistry*, v. 94, p. 116-125, 2020.

SHI, L.; ZHANG, J.; ZHAO, M.; TANG, S.; CHENG, X.; ZHANG, W.; WANG, Q. Effects of polyethylene glycol on the surface of nanoparticles for targeted drug delivery. *Nanoscal***e**, v. 13, n. 24, p. 10748-10764, 2021.

SMIRNOVA, S. V.; LYSKOVTSEVA, K. A.; PLETNEV, I. V. Extraction and determination of synthetic food dyes using tetraalkylammonium based liquid-liquid extraction. *Microchemical Journal*, v. 162, p. 105833, 2021.

SWAIN, R.; STEPHAN, J. *Enzyme treated maple syrup and shelf stable products containing enzyme treated maple syrup***.** US Patent 6.936.290, 2005.

VALERIO, S. G.; ALVES, J. S.; KLEIN, M. P.; RODRIGUES, R. C.; HERTZ, P. F. High operational stability of invertase from *Saccharomyces cerevisiae* immobilized on chitosan nanoparticles. *Carbohydrate polymers*, v. 92, n. 1, p. 462-468, 2013.

VERNAU, J., KULA, M. R. Extraction of proteins from biological raw material using aqueous polyethylene glycol-citrate phase systems. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, v. 12, p.397-404, 1990.

VICENTE, A. A. *Preparação de açúcar invertido por meio de invertase imobilizada em sílica*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Química. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2000.

WYSOCZANSKA, K.; SILVÉRIO, S. C.; TEIXEIRA, J. A.; MACEDO, E. A. Cation effect on the (PEG 8000+ sodium sulfate) and (PEG 8000+ magnesium sulfate) aqueous two-phase system: Relative hydrophobicity of the equilibrium phases. *The Journal of Chemical Thermodynamics,* v. 91, p. 321-326, 2015.

ZIELIŃSKA-DAWIDZIAK, M.; MICHALAK, M. Influence of magnetic field on extraction of model proteins in polyethylene glycol/magnesium sulfate aqueous two-phase system. *Journal of Chromatography B*, v. 1126, p. 121760, 2019.

RODRIGUES, Eliana Maria Gonçalves. Possui graduação em Engenharia Industrial Química pela Faculdade de Engenharia Química de Lorena, Mestrado em Biotecnologia Industrial pela Faculdade de Engenharia Química de Lorena na área de Microbiologia Aplicada e Genética de Microrganismos, Doutorado em Engenharia Química na área de Processos Biotecnológicos pela Universidade Estadual de Campinas e Pós-Doutorado pela USP. Atualmente é Professor Ensino Superior, Referência III, da Faculdade de Tecnologia de Piracicaba Dep. Roque Trevisan. Tem experiência na área de Engenharia Química, com ênfase em Purificação de Enzimas, atuando principalmente nos seguintes temas: microrganismos, enzimas, fermentação e extração líquido-líquido.