

Avaliação da sustentabilidade de alternativas da utilização da vinhaça

OLIVEIRA, Nélío 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 suroenergético 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 (Christofolletti *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 CO₂ 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 filtração 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

Análise de Viabilidade Técnica da Aplicação da Vinhaça nas Unidades Agroindustriais de SP (Safrá 2009/2010)

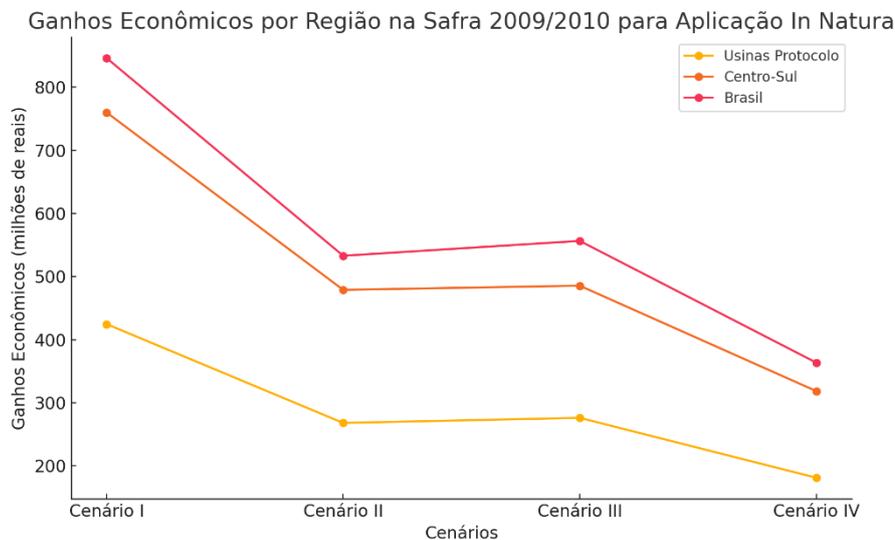


Fonte: elaborado pelos autores.

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: ¹Embrapa; ² ANEEL, (2022); ³CRUZ et al.,(2013); ⁴CETESB (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.

Bioenergia em revista: diálogos, ano/vol. 15, n. 1, jan./jun. 2025. p. 51-69.

Avaliação da sustentabilidade de alternativas da utilização da vinhaça

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

ELIA NETO, André. *Uso e reuso de água na indústria canavieira*. Workshop on the impact os new technologies on the sustentability of the sugarcane/Bioethanol production 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, Nélío 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, Fábio César da. Possui graduação em Engenharia Agrônômica 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.