



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICA**

VICTOR HUGO LAVIOLA DE OLIVEIRA

**MODELAGEM MATEMÁTICA NA ANÁLISE ENERGÉTICA DA PRODUÇÃO
AGRÍCOLA DO MILHO PARA SILAGEM: ESTUDO DE CASO EM UMA
PROPRIEDADE RURAL DE MINAS GERAIS**

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2026**

VICTOR HUGO LAVIOLA DE OLIVEIRA

**MODELAGEM MATEMÁTICA NA ANÁLISE ENERGÉTICA DA PRODUÇÃO
AGRÍCOLA DO MILHO PARA SILAGEM: ESTUDO DE CASO EM UMA
PROPRIEDADE RURAL DE MINAS GERAIS**

Monografia apresentada ao Curso de Licenciatura em
Matemática da Universidade Federal de Viçosa como
parte dos requisitos para obtenção do título de Licenciado
em Matemática.

Orientadora: Prof^a. Dra. Natalia dos Santos Renato

VIÇOSA – MINAS GERAIS
2026

VICTOR HUGO LAVIOLA DE OLIVEIRA

**MODELAGEM MATEMÁTICA NA ANÁLISE ENERGÉTICA DA PRODUÇÃO
AGRÍCOLA DO MILHO PARA SILAGEM: ESTUDO DE CASO EM UMA
PROPRIEDADE RURAL DE MINAS GERAIS**

Monografia apresentada ao Curso de Licenciatura em Matemática da Universidade Federal de Viçosa como parte dos requisitos para obtenção do título de Licenciado em Matemática.

Orientadora: Prof^a. Dra. Natalia dos Santos Renato

Prof^a. Dra. Natalia dos Santos Renato
(Orientadora – Universidade Federal de Viçosa)

Victor Hugo Laviola de Oliveira
(Estudante – Autor do Trabalho)

VICTOR HUGO LAVIOLA DE OLIVEIRA

**MODELAGEM MATEMÁTICA NA ANÁLISE ENERGÉTICA DA PRODUÇÃO
AGRÍCOLA DO MILHO PARA SILAGEM: ESTUDO DE CASO EM UMA
PROPRIEDADE RURAL DE MINAS GERAIS**

Monografia apresentada ao Curso de Licenciatura em
Matemática da Universidade Federal de Viçosa como
parte dos requisitos para obtenção do título de Licenciado
em Matemática.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Natalia dos Santos Renato

BANCA AVALIADORA:

Prof. Dra. Natalia dos Santos Renato
(Orientadora – Universidade Federal de Viçosa)

Prof. Dra. Ariane Piovezan Entringer
(Professora – Universidade Federal de Viçosa)

Luna Lilás Henriques Ildefonso
(Estudante de Doutorado - Universidade Federal de Viçosa)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Marcelo e Fabiane e aos meus irmãos, Gustavo Henrique e Augusto Cesar, pelo apoio, incentivo e amor que tornaram possível cada etapa desta trajetória.

Com profunda gratidão e carinho por todo o apoio e incentivo ao longo desta trajetória.

Dedico também a todos que veem a matemática como uma forma de contextualização e transformação, compreendendo que ela não é uma disciplina isolada, mas um conhecimento que dialoga com o meio ambiente, com a natureza e com as diversas dimensões da realidade.

AGRADECIMENTOS

Desde criança, imaginar o futuro sempre foi o primeiro passo das minhas maiores conquistas. Entre brincadeiras e quadros improvisados, eu já ensaiava aquilo que, hoje, se torna realidade: ser professor – não apenas um desejo, mas uma paixão que cresceu comigo.

Ao longo de minha trajetória na UFV, aprendi muito além dos conteúdos. Aprendi com pessoas, com experiências e, principalmente, com meus professores, que me ensinaram a enxergar a matemática com outros olhos. Hoje percebo que é através dela que realizo aquele sonho de infância que um dia pareceu tão distante. Quantas vezes subi a reta da Universidade sem imaginar quando esse momento chegaria... E agora ele chegou.

Com as bênçãos de Deus e de Nossa Senhora Aparecida, que nunca desistiram de mim e sempre me guiaram nas melhores escolhas, sigo com o coração cheio de gratidão.

Agradeço, com todo o meu amor, aos meus pais, Marcelo e Fabiane; aos meus irmãos, Gustavo Henrique e Augusto Cesar; e à minha cunhada, Thassiana, por sempre acreditarem em mim e no meu potencial, até mesmo nos momentos em que eu mesmo deixei de acreditar. Obrigado pelo apoio, pelo carinho, pelas palavras de incentivo e por permanecerem ao meu lado em cada etapa dessa caminhada. Essa conquista também é de vocês.

Aos meus familiares, minha eterna gratidão pelo suporte e carinho. Aos meus amigos de São Francisco do Glória, obrigado por todos os anos de convivência e cumplicidade, que fizeram parte da construção de quem sou hoje.

Aos meus amigos de curso, que levarei para a vida, especialmente aqueles que contribuíram para a realização deste objetivo, minha eterna gratidão pelos momentos de estudo, pelo respeito e, principalmente, pela companhia.

Aos meus professores e, em especial, às professoras Ariane, Caroline, Cristiane, Laís, Marli e Rejane, mulheres que marcaram profundamente minha trajetória acadêmica e humana, deixo meu mais sincero agradecimento pelos ensinamentos, pelo apoio e pelo exemplo de força e sensibilidade.

Expresso minha profunda gratidão à minha orientadora, Prof.^a Natalia dos Santos Renato, pela orientação ao longo de duas iniciações científicas, e também à minha atual orientadora de iniciação científica, Prof.^a Marli Duffles Donato Moreira. Essas experiências foram fundamentais para minha formação acadêmica e pessoal.

Ao Departamento de Matemática da UFV, agradeço pela oportunidade de fazer parte do Programa Institucional de Bolsa de Iniciação à Docência (PIBID), experiência que fortaleceu ainda mais minha paixão pelo ensino e confirmou minha escolha pela docência.

Inspirado pela mensagem de The Nights, de Avicii, sigo com o propósito de viver intensamente cada oportunidade, valorizar as experiências e construir uma trajetória que valha a pena ser lembrada, com coragem para enfrentar desafios, aproveitar cada momento e seguir em frente, sempre em busca de novos caminhos. Porque a criança que um dia acreditou ainda vive em mim, foi ela que me trouxe até aqui e é ela que vai me levar ainda mais longe.

EPÍGRAFE

"Educar verdadeiramente não é ensinar fatos novos ou enumerar fórmulas prontas, mas sim preparar a mente para pensar."

Albert Einstein

RESUMO

A produção de milho para silagem apresenta elevada demanda energética devido ao uso intensivo de máquinas agrícolas, combustíveis fósseis e insumos industriais ao longo do sistema produtivo. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo modelar e analisar o consumo energético não renovável nas diferentes etapas da produção de milho para silagem em uma Propriedade A, localizada em um município do estado de Minas Gerais. A pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso de natureza aplicada e abordagem quantitativa, fundamentado na análise energética e na modelagem matemática de sistemas produtivos agrícolas. Foram avaliadas as entradas energéticas diretas e indiretas associadas ao consumo de combustíveis, fertilizantes, sementes, mão de obra, máquinas e implementos agrícolas. Os resultados indicaram consumo energético total de 110.809,84 MJ, com predominância da energia direta, responsável por 96,89% da energia de entrada do sistema. A etapa de tratos culturais apresentou a maior intensidade energética, concentrando 53,14% do consumo total, principalmente em função da elevada participação de fertilizantes nitrogenados. A energia de saída estimada para a produção de silagem foi de 1.188.952 MJ, resultando em eficiência energética de 10,73, indicando que o sistema produz aproximadamente 10,73 unidades de energia para cada unidade consumida. A análise matemática integrada permitiu identificar o nitrogênio como a variável de maior impacto sobre o consumo energético global do sistema, evidenciando a necessidade de estratégias voltadas à redução da dependência de insumos de alta intensidade energética. Conclui-se que o sistema apresenta elevada eficiência energética, embora ainda dependa fortemente de fontes não renováveis.

Palavras-chave: modelagem matemática; análise energética; eficiência energética; sustentabilidade agrícola.

ABSTRACT

Corn silage production presents high energy demand due to the intensive use of agricultural machinery, fossil fuels, and industrial inputs throughout the production system. In this context, the present study aimed to model and analyze the non-renewable energy consumption at the different stages of corn silage production on Property A, located in a municipality in the state of Minas Gerais, Brazil. The research is characterized as a case study of applied nature and quantitative approach, based on energy analysis and mathematical modeling of agricultural production systems. Direct and indirect energy inputs associated with the consumption of fuels, fertilizers, seeds, labor, machinery, and agricultural implements were evaluated. The results indicated a total energy consumption of 110,809.84 MJ, with predominance of direct energy, responsible for 96.89% of the total energy input of the system. The crop management stage showed the highest energy intensity, accounting for 53.14% of the total consumption, mainly due to the high participation of nitrogen fertilizers. The estimated output energy for silage production was 1,188,952 MJ, resulting in an energy efficiency of 10.73, indicating that the system produces approximately 10.73 units of energy for each unit consumed. The integrated mathematical analysis identified nitrogen as the variable with the greatest impact on the overall energy consumption of the system, highlighting the need for strategies aimed at reducing dependence on high-energy-intensity inputs. It is concluded that the system presents high energy efficiency, although it still strongly depends on non-renewable sources.

Keywords: mathematical modeling; energy analysis; energy efficiency; agricultural sustainability.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	JUSTIFICATIVA	14
3	REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1	A cultura do milho para silagem e o contexto energético da agricultura .	16
3.2	Energias renováveis e sustentabilidade no meio rural	17
3.3	Modelagem matemática aplicada a sistemas produtivos agrícolas	19
3.4	Análise e balanço energético na agricultura	22
3.5	Avaliação do Ciclo de Vida	25
4	PROBLEMA DE PESQUISA	26
5	OBJETIVOS	27
6	METODOLOGIA	28
6.1	Delineamento do estudo e definição do sistema	28
6.2	Caracterização técnico-operacional do sistema produtivo	29
6.3	Estrutura analítica e parametrização	32
6.4	Coeficientes e variáveis energéticas	33
6.5	Formulação matemática e indicadores de desempenho	34
7	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
7.1	Caracterização e Análise das Entradas Energéticas do Sistema	41
7.2	Energia Total de Entrada	42
7.2.1	Análise por etapa do sistema produtivo	44
7.2.1.1	Preparo do solo	44
7.2.1.2	Semeadura e adubação	44
7.2.1.3	Tratos culturais	45
7.2.1.4	Colheita	46
7.2.1.5	Transporte	47
7.2.1.6	Armazenamento	48
7.2.2	Análise global das entradas energéticas	49
7.3	Energia de Saída	51
7.4	Eficiência Energética	52
7.5	Intensidade Energética por Etapa	53
7.6	Análise Matemática Integrada do Sistema Energético	54
7.6.1	Análise de sensibilidade por derivadas parciais	55
7.6.2	Eficiência energética do sistema	55

7.6.3	Modelagem da energia de saída	56
7.6.4	Análise da eficiência via cálculo diferencial	56
7.6.5	Interpretação sob a ótica da otimização	56
7.6.6	Considerações finais	57
7.7	Avaliação do Ciclo de Vida	57
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

A agricultura moderna caracteriza-se pelo elevado consumo de energia ao longo de seus sistemas produtivos, especialmente em atividades que dependem intensivamente de mecanização agrícola, fertilizantes industriais e combustíveis fósseis (Martins, 2015). Nesse contexto, a produção de milho para silagem destaca-se como uma importante atividade agropecuária, amplamente utilizada na alimentação de rebanhos bovinos, sobretudo na pecuária leiteira e de corte. Entretanto, as diferentes etapas envolvidas nesse processo produtivo, como preparo do solo, semeadura, adubação, tratos culturais, colheita, transporte e armazenamento, demandam significativa quantidade de energia, tornando relevante a análise da eficiência energética desses sistemas (Martins, 2015).

O crescimento da demanda por alimentos e o avanço tecnológico no meio rural contribuíram para o aumento da produtividade agrícola, mas também ampliaram a dependência de fontes energéticas não renováveis (Pereira; Castro, 2022). A utilização intensiva de combustíveis fósseis e insumos industriais está associada ao aumento dos custos de produção e aos impactos ambientais relacionados à emissão de gases de efeito estufa. Dessa forma, torna-se necessário compreender como a energia é utilizada nos sistemas agrícolas e quais etapas apresentam maior intensidade energética, possibilitando a busca por alternativas mais sustentáveis e eficientes (Pereira; Castro, 2022).

Nesse cenário, a análise e o balanço energético surgem como importantes ferramentas para avaliar o desempenho dos sistemas produtivos agrícolas (Campos, 2004). Essas metodologias permitem quantificar as entradas e saídas de energia do sistema, identificar os componentes de maior consumo energético e calcular indicadores relacionados à eficiência produtiva e sustentabilidade. Além disso, possibilitam avaliar o potencial de inserção de fontes renováveis de energia em atividades agropecuárias, contribuindo para a redução da dependência energética e dos impactos ambientais associados à produção agrícola (Campos, 2004).

Paralelamente, a modelagem matemática constitui um instrumento relevante para a representação e interpretação de sistemas reais, permitindo estruturar quantitativamente variáveis e relações presentes nos processos produtivos. Por meio da construção de modelos matemáticos, torna-se possível organizar dados operacionais, representar fluxos energéticos e gerar indicadores capazes de auxiliar na análise e compreensão do comportamento energético do sistema agrícola. Dessa forma, a modelagem matemática possibilita integrar conceitos matemáticos à análise de problemas concretos, evidenciando sua aplicabilidade em contextos interdisciplinares (Bassanezi, 2002).

No contexto da produção de milho para silagem, a utilização da modelagem matemática associada à análise energética permite compreender de forma sistemática o consumo de energia ao longo das diferentes etapas do processo produtivo. Essa abordagem possibilita identificar operações de maior demanda energética, avaliar a eficiência do sistema e subsidiar discussões

relacionadas à sustentabilidade e ao uso racional de recursos no meio rural.

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo modelar e analisar o consumo energético não renovável nas diferentes etapas da produção de milho para silagem em uma Propriedade A, localizada em um município do estado de Minas Gerais. Busca-se identificar as etapas de maior intensidade energética, calcular indicadores de eficiência energética e discutir possibilidades de inserção de fontes renováveis de energia no sistema produtivo analisado.

A pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso de natureza aplicada e abordagem quantitativa, fundamentado na análise energética de sistemas agrícolas e na modelagem matemática de fluxos energéticos. Os dados utilizados foram obtidos por meio de levantamento técnico realizado diretamente na propriedade estudada, complementados por coeficientes energéticos provenientes da literatura especializada.

Por fim, este estudo busca contribuir para a compreensão da relação entre matemática, energia e produção agrícola, demonstrando o potencial da modelagem matemática como ferramenta de análise aplicada a sistemas produtivos rurais. Além disso, pretende fornecer subsídios para discussões relacionadas à eficiência energética, sustentabilidade e racionalização do uso de recursos na produção de milho para silagem.

2 JUSTIFICATIVA

A crescente demanda por energia e a forte dependência de fontes não renováveis têm impulsionado a busca por sistemas produtivos mais eficientes do ponto de vista energético. No setor agrícola, essa necessidade se torna ainda mais relevante, uma vez que a produção de alimentos envolve elevado consumo de combustíveis, fertilizantes e eletricidade, configurando a agricultura como um sistema intensivo em energia. Nesse contexto, a análise energética de sistemas produtivos se consolida como ferramenta científica essencial para compreender o uso de energia e orientar decisões que promovam maior eficiência e sustentabilidade.

Do ponto de vista acadêmico, este estudo se justifica por integrar a modelagem matemática à análise de um sistema produtivo real, aplicando conceitos como razão, proporção, somatórios, funções e indicadores quantitativos. A pesquisa contribui para a área de Matemática Aplicada ao demonstrar como modelos determinísticos podem representar sistemas complexos, transformando dados operacionais em indicadores de desempenho energético. Além disso, incorpora conceitos de cálculo diferencial, especialmente por meio do uso de derivadas parciais para analisar a influência de múltiplas variáveis sobre o consumo de energia e o desempenho do sistema. A aplicação de técnicas de otimização matemática possibilita a identificação de condições operacionais mais eficientes, contribuindo para a minimização de desperdícios e para a maximização da produtividade. Dessa forma, o estudo evidencia como ferramentas matemáticas avançadas podem apoiar a tomada de decisões e a melhoria contínua de processos industriais e agroindustriais.

Sob a perspectiva profissional e técnica, o trabalho fornece subsídios para a gestão energética no meio rural. Ao identificar as etapas de maior consumo de energia na produção de silagem de milho, o estudo possibilita direcionar intervenções de forma mais racional, reduzindo desperdícios e apoiando a tomada de decisão do produtor rural quanto à adoção de alternativas energéticas mais adequadas.

A relevância social e ambiental também se destaca, pois a melhoria da eficiência energética no setor agroindustrial contribui para a redução da pressão sobre recursos energéticos convencionais. Minas Gerais, com sua expressiva tradição na agropecuária e na produção de forragens para a manutenção de rebanhos, constitui um cenário estratégico para esse tipo de investigação.

Além disso, o domínio de conhecimentos matemáticos e de ferramentas de análise por parte do produtor rural possibilita uma gestão mais eficiente da propriedade, favorecendo o planejamento da produção, a avaliação de custos energéticos e a definição de estratégias que aumentem a rentabilidade e a sustentabilidade da atividade agrícola. Nesse contexto, a matemática aplicada torna-se um instrumento importante para a tomada de decisões no meio rural, contribuindo não apenas para o desenvolvimento econômico da propriedade, mas também para o desenvolvimento social do produtor e de sua comunidade. Entretanto, observa-se que

muitos produtores ainda possuem acesso limitado a esse tipo de conhecimento técnico, o que evidencia a necessidade de estudos e ações voltadas à difusão de práticas de gestão e análise no setor agropecuário.

Soma-se a isso a motivação regional e pessoal, uma vez que o estudo de caso foi desenvolvido em uma propriedade familiar localizada em um município do estado de Minas Gerais. O município apresenta sua economia fortemente baseada na agricultura e na pecuária familiar, atividades nas quais a produção de milho para silagem desempenha papel relevante. A realização da pesquisa na região de origem do pesquisador e em um contexto de proximidade com a realidade local facilitou o acesso a dados representativos e confiáveis, além de possibilitar uma análise mais sensível aos desafios enfrentados pelos pequenos produtores rurais da região.

Outro aspecto relevante observado no meio rural refere-se ao nível de escolaridade dos produtores. Uma parcela significativa dos produtores rurais não possui o ensino médio completo, evidenciando a baixa escolaridade ainda recorrente nesse contexto. Essa realidade pode limitar o acesso a informações técnicas, ao uso de ferramentas de gestão e à adoção de tecnologias voltadas para a otimização da produção agrícola. Nesse sentido, a limitação educacional pode dificultar a implementação de práticas mais eficientes e sustentáveis nas propriedades rurais. Dessa forma, torna-se fundamental ampliar o acesso à capacitação e à assistência técnica no meio rural, promovendo melhorias na produtividade, na rentabilidade e no desenvolvimento social dos produtores rurais.

Por fim, há uma justificativa formativa relacionada à Licenciatura em Matemática. O estudo evidencia o potencial da modelagem matemática como ferramenta para compreender e analisar fenômenos do mundo real, especialmente aqueles relacionados aos sistemas produtivos agrícolas. Essa abordagem demonstra que a matemática, para além da abstração teórica, pode ser aplicada como instrumento de análise e apoio à tomada de decisão em sistemas agrícolas. Dessa forma, o estudo justifica-se por articular matemática, energia e produção agrícola, utilizando a modelagem matemática como suporte para a avaliação da eficiência energética e para a promoção de práticas mais sustentáveis no meio rural.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 A cultura do milho para silagem e o contexto energético da agricultura

Segundo a Syngenta (2026), o milho destaca-se na produção agrícola desempenhando um papel central desde o período da colonização. Além disso, seu cultivo consolidou-se não apenas como atividade econômica, mas também como elemento de relevância cultural, refletido nas técnicas agrícolas desenvolvidas e nas formas de utilização do produto.

Historicamente, e ainda nos dias atuais, observa-se em diversas propriedades rurais mineiras a existência de um sistema integrado de produção e consumo de milho, caracterizado pela autossuficiência e direcionado majoritariamente às necessidades internas das fazendas. Este sistema abrange a alimentação humana e animal, sendo fundamental para o sustento dos moradores e para a manutenção dos rebanhos, tanto no suporte às atividades agrícolas quanto na produção de carne (Syngenta, 2026).

O milho é o cereal mais cultivado em Minas Gerais e no Brasil, sendo encontrado em mais de 90% das propriedades rurais do estado. A produção de milho tem apresentado avanços significativos nos últimos anos, resultantes de melhores práticas de manejo e uso do solo, assim como pelo desenvolvimento genético de novas variedades. No entanto, ainda há uma parte considerável dos agricultores que enfrenta baixos níveis de produtividade, indicando a necessidade de ações mais eficazes para elevar esses índices (Emater, 2016).

Além da produção de grãos, o milho possui grande importância na produção de silagem, constituindo uma das principais fontes de alimentação volumosa para rebanhos bovinos, especialmente na pecuária leiteira e de corte. A silagem consiste em um processo de conservação de forragem realizado em ambiente anaeróbico, permitindo o armazenamento do alimento por longos períodos e garantindo a alimentação animal durante épocas de escassez de pastagens, principalmente nos períodos de seca (Batista et al. 2024).

A cultura do milho destaca-se para produção de silagem devido às suas características agrônômicas favoráveis, como elevada produtividade de biomassa, bom valor nutricional, alta concentração energética e facilidade de fermentação (Embrapa, 2023). Além disso, o aproveitamento da planta inteira contribui para maior eficiência no uso da matéria produzida, tornando o milho uma das principais culturas destinadas à alimentação animal no Brasil.

Em Minas Gerais, a produção de milho para silagem apresenta elevada relevância econômica em razão da expressiva participação da atividade pecuária no estado. A utilização de silagem contribui para manutenção da produtividade animal ao longo do ano, reduzindo os impactos causados pela sazonalidade da produção de pastagens e proporcionando maior estabilidade aos sistemas pecuários (Embrapa, 2023).

Entretanto, a produção de milho para silagem demanda elevado nível de utilização de insumos e operações mecanizadas, envolvendo etapas como preparo do solo, semeadura, adubação, aplicação de defensivos agrícolas, colheita, transporte, compactação

e armazenamento da silagem (Seki et al., 2009). Essas operações requerem significativa quantidade de energia, principalmente proveniente do consumo de combustíveis fósseis utilizados em tratores, colhedoras e demais máquinas agrícolas.

Além do consumo direto de energia associado às operações mecanizadas, a produção agrícola também apresenta elevado consumo indireto de energia relacionado à fabricação de fertilizantes, defensivos agrícolas, sementes e máquinas. Entre esses insumos, os fertilizantes nitrogenados destacam-se como um dos principais responsáveis pela demanda energética indireta dos sistemas agrícolas, devido ao elevado consumo de energia necessário para sua produção industrial (Lima, 2024).

O avanço da mecanização e da modernização agrícola contribuiu significativamente para o aumento da produtividade das culturas, incluindo o milho destinado à silagem. Entretanto, esse processo também intensificou a dependência energética da agricultura moderna, ampliando o consumo de combustíveis, fertilizantes e tecnologias agrícolas. Dessa forma, o aumento da produtividade passou a estar associado a maiores demandas energéticas, tornando necessária a avaliação da eficiência do uso desses recursos nos sistemas produtivos (Orben, 2016).

Nesse contexto, a agricultura pode ser compreendida como um sistema de transformação de energia, no qual recursos naturais, insumos industriais e trabalho humano são convertidos em produtos agrícolas destinados à alimentação humana e animal. A análise energética de sistemas produtivos permite estimar indicadores como eficiência energética, balanço energético e relação entrada/saída de energia, contribuindo para avaliar a sustentabilidade da agricultura frente ao uso de fontes não renováveis (Albuquerque et al., 2013).

Assim, o estudo da cultura do milho para silagem sob a perspectiva energética possibilita identificar as principais entradas e saídas de energia do sistema produtivo, contribuindo para avaliações relacionadas à eficiência energética, sustentabilidade e racionalização do uso de recursos na produção agrícola.

3.2 Energias renováveis e sustentabilidade no meio rural

A crescente demanda por alimentos e o avanço da mecanização agrícola intensificaram o consumo de energia no meio rural, aumentando também a dependência de fontes não renováveis (Romero, 2008). Nesse contexto, as energias renováveis vêm ganhando destaque como alternativas capazes de contribuir para a sustentabilidade das atividades agropecuárias, reduzindo impactos ambientais e promovendo maior eficiência energética nos sistemas produtivos.

As fontes renováveis de energia são obtidas a partir de recursos naturais que se renovam continuamente, como radiação solar, vento, biomassa e recursos hídricos, apresentando menores emissões de gases de efeito estufa quando comparadas às fontes convencionais de origem fóssil. No setor agrícola, destacam-se principalmente a energia solar fotovoltaica, a biomassa e o biogás, que podem ser utilizados em sistemas de irrigação, bombeamento de água, secagem de grãos, aquecimento e aproveitamento energético de resíduos agrícolas e pecuários (Engelc Ambiental,

2023).

Entre as fontes renováveis, a energia solar apresenta grande potencial de utilização no Brasil devido à elevada incidência solar ao longo do ano. A utilização da energia solar no meio rural tem crescido devido à possibilidade de redução dos custos energéticos e à maior autonomia das propriedades agrícolas. Além disso, o aproveitamento da biomassa e do biogás provenientes de resíduos orgânicos contribui para o uso sustentável dos recursos disponíveis nas propriedades rurais, favorecendo a redução de desperdícios e a diversificação da matriz energética agrícola (Silva et al., 2021).

A biomassa possui relevante potencial energético no meio rural, especialmente em sistemas agropecuários nos quais há elevada geração de resíduos orgânicos. Resíduos provenientes da produção agrícola, como palhadas, restos culturais e subprodutos do milho, podem ser utilizados para geração de energia térmica ou elétrica. Da mesma forma, resíduos pecuários provenientes da bovinocultura podem ser aproveitados na produção de biogás por meio de biodigestores, permitindo transformar resíduos orgânicos em fonte de energia renovável.

No contexto da produção de milho para silagem, a utilização de biomassa e o aproveitamento energético de resíduos agrícolas apresentam potencial para contribuir com sistemas produtivos mais sustentáveis. Em propriedades rurais que integram agricultura e pecuária, o reaproveitamento de resíduos orgânicos provenientes da produção animal e vegetal pode reduzir desperdícios, minimizar impactos ambientais e ampliar a autonomia energética das atividades agropecuárias.

Além dos benefícios ambientais, a utilização de fontes renováveis pode contribuir para a melhoria da eficiência energética dos sistemas agrícolas, reduzindo custos associados ao consumo de combustíveis fósseis e à utilização de energia elétrica convencional. A adoção de tecnologias sustentáveis no meio rural favorece o uso racional de recursos energéticos e possibilita maior estabilidade econômica aos produtores rurais, especialmente diante das oscilações nos preços dos combustíveis e da energia (Nogueira, 2023).

Apesar das vantagens ambientais e econômicas proporcionadas pelas energias renováveis, sua adoção ainda enfrenta algumas limitações, como elevados custos iniciais de implantação, necessidade de infraestrutura adequada e dependência de fatores climáticos em determinadas tecnologias. Entretanto, os avanços tecnológicos e o aumento dos investimentos no setor energético têm ampliado a viabilidade dessas fontes no meio rural (Engelc Ambiental, 2023).

A utilização de fontes renováveis também possui importante papel na redução da dependência de combustíveis fósseis. A agricultura moderna apresenta elevada demanda energética associada à utilização de combustíveis, fertilizantes e defensivos agrícolas, sendo os fertilizantes nitrogenados um dos principais responsáveis pelo consumo indireto de energia não renovável (Silber, 2021). Dessa forma, a busca por alternativas energéticas mais sustentáveis torna-se essencial para reduzir os impactos ambientais decorrentes da produção agrícola.

A modernização agrícola, embora tenha proporcionado ganhos expressivos de

produtividade, também intensificou a dependência energética dos sistemas produtivos. O uso crescente de máquinas agrícolas, sistemas mecanizados e insumos industriais elevou significativamente o consumo energético no meio rural. Nesse cenário, as energias renováveis surgem como importantes alternativas para promover maior sustentabilidade, reduzir emissões de gases de efeito estufa e favorecer a transição para uma matriz energética mais limpa no setor agropecuário.

Estudos recentes apontam que a expansão das fontes renováveis, especialmente solar e eólica, tem contribuído significativamente para a redução da dependência energética mundial de combustíveis fósseis e para a diminuição das emissões de dióxido de carbono (CO_2) (O Instalador, 2023). Nesse contexto, a transição energética no meio rural constitui uma estratégia importante para promover a descarbonização das atividades agropecuárias e ampliar a sustentabilidade dos sistemas de produção.

Além disso, a adoção de fontes renováveis de energia pode favorecer a segurança energética das propriedades rurais, reduzindo a vulnerabilidade dos produtores em relação às oscilações dos preços de combustíveis e da energia elétrica convencional. Em sistemas produtivos agrícolas, especialmente aqueles que apresentam elevado consumo energético, a diversificação da matriz energética contribui para maior estabilidade operacional e econômica das atividades desenvolvidas no campo.

Mesmo em sistemas produtivos nos quais a energia elétrica não representa o principal componente do consumo energético, a discussão sobre energias renováveis permanece relevante, pois reforça a importância da redução da participação de fontes não renováveis nos processos produtivos e incentiva práticas agrícolas mais sustentáveis. Dessa forma, a inserção de tecnologias voltadas à geração e ao aproveitamento de energia renovável pode contribuir tanto para a conservação ambiental quanto para a melhoria da eficiência produtiva no meio rural (Redação Agrishow, 2025).

Nesse sentido, a inserção de tecnologias e práticas voltadas à sustentabilidade energética no meio rural representa uma estratégia importante para promover maior equilíbrio entre produtividade agrícola, eficiência energética e conservação ambiental. Assim, a análise do consumo energético e da participação de fontes renováveis nos sistemas agrícolas torna-se fundamental para compreender o nível de sustentabilidade e eficiência energética das atividades agropecuárias.

3.3 Modelagem matemática aplicada a sistemas produtivos agrícolas

A modelagem matemática constitui uma ferramenta fundamental para a compreensão, representação e análise de fenômenos presentes em sistemas reais. Para Bassanezi (2002, p. 16), “A modelagem matemática consiste na arte de transformar problemas da realidade em problemas matemáticos e resolvê-los, interpretando suas soluções na linguagem do mundo real”. Nesse contexto, a modelagem corresponde ao processo de construção, validação e utilização de modelos matemáticos, permitindo representar e interpretar a realidade por meio de estruturas

formais da matemática.

A modelagem matemática desenvolve-se por meio de etapas que orientam a compreensão e a representação de fenômenos reais em linguagem matemática. De acordo com Bassanezi (2002, p. 26–31), esse processo pode ser organizado em seis fases principais: experimentação, abstração, resolução, validação, modificação e aplicação.

A **experimentação** consiste na obtenção de dados referentes ao fenômeno estudado, podendo envolver diferentes métodos experimentais e o uso de técnicas estatísticas para aumentar a confiabilidade das informações coletadas. Em seguida, ocorre a **abstração**, etapa na qual são identificadas as variáveis relevantes do sistema e formuladas hipóteses que permitam representar o problema em termos matemáticos, simplificando a realidade sem perder seus aspectos essenciais.

Na fase de **resolução**, as hipóteses formuladas são expressas por meio de equações ou relações matemáticas, possibilitando a obtenção de soluções por meio de métodos analíticos ou computacionais. Posteriormente, realiza-se a **validação**, na qual os resultados obtidos pelo modelo são comparados com dados empíricos do sistema real, avaliando-se o grau de aproximação entre as previsões do modelo e os valores observados.

Caso sejam identificadas inconsistências ou limitações, procede-se à **modificação** do modelo, com ajustes nas hipóteses ou na estrutura matemática utilizada. Por fim, na etapa de **aplicação**, o modelo validado é utilizado para interpretar o fenômeno estudado e apoiar a análise do sistema investigado.

A construção de modelos matemáticos envolve necessariamente processos de simplificação da realidade. Dessa forma, os modelos não representam integralmente todos os aspectos do sistema analisado, mas sim os elementos considerados mais relevantes para o estudo proposto. Assim, a definição adequada das hipóteses, variáveis e parâmetros torna-se fundamental para garantir que o modelo apresente resultados coerentes e compatíveis com o fenômeno investigado.

No contexto de sistemas produtivos agrícolas, a modelagem matemática possibilita representar processos e quantificar relações entre variáveis relevantes, como insumos, operações mecanizadas, produtividade e consumo de energia. Dessa forma, constitui uma ferramenta importante para a análise energética de sistemas agrícolas, permitindo avaliar a eficiência do uso de recursos e apoiar a busca por sistemas de produção mais sustentáveis, como proposto no presente estudo sobre a produção de milho para silagem em uma propriedade rural de Minas Gerais.

Nessa perspectiva, Burak (1992, p. 62) define a modelagem matemática como um conjunto de procedimentos que busca representar e explicar, por meio da matemática, fenômenos presentes no cotidiano humano, estabelecendo uma correspondência entre a realidade e estruturas matemáticas que possibilitam a realização de previsões e o suporte à tomada de decisões. De forma complementar, Barbosa (2009) destaca que a modelagem matemática permite analisar problemas provenientes do cotidiano, do mundo do trabalho ou de diferentes áreas científicas,

possibilitando a construção de modelos capazes de representar situações reais. Nesse sentido, a aplicação da modelagem em sistemas produtivos torna possível investigar relações entre variáveis relevantes, identificar padrões de funcionamento e avaliar a eficiência dos processos envolvidos.

Na agricultura, diferentes tipos de modelos matemáticos podem ser utilizados para representar sistemas produtivos e auxiliar na análise de dados agrícolas. Entre as abordagens mais empregadas destacam-se modelos estatísticos, modelos lineares, modelos empíricos, técnicas de regressão, métodos de otimização e modelos de simulação. Essas ferramentas permitem estimar produtividade, analisar o comportamento de variáveis agrícolas, representar fluxos energéticos e compreender relações entre consumo de insumos e produção obtida.

Além disso, a utilização de recursos computacionais ampliou significativamente as possibilidades de aplicação da modelagem matemática em sistemas agrícolas. O uso de softwares, planilhas eletrônicas e ferramentas computacionais possibilita o armazenamento, processamento e análise de grandes volumes de dados, favorecendo a realização de análises quantitativas mais precisas e contribuindo para a construção e validação de modelos matemáticos aplicados ao meio rural.

Diversos estudos apontam que a modelagem matemática pode ser empregada na análise de sistemas agrícolas para compreender a dinâmica da produção, estimar produtividade, avaliar o uso de recursos naturais e analisar o consumo energético associado aos processos produtivos. Nesse contexto, modelos matemáticos possibilitam integrar dados provenientes de diferentes etapas da produção agrícola, contribuindo para uma análise mais sistemática e quantitativa dos sistemas produtivos (Fei e McCarl, 2023).

A utilização de modelos matemáticos na agricultura também permite representar quantitativamente variáveis relacionadas ao balanço energético, como consumo de combustíveis, utilização de fertilizantes, energia incorporada em insumos, produtividade agrícola e produção de biomassa. A análise dessas variáveis possibilita compreender os fluxos energéticos presentes no sistema produtivo, identificar etapas de maior consumo energético e avaliar a eficiência do uso de recursos empregados na produção agrícola.

Além disso, a modelagem matemática tem sido utilizada em conjunto com metodologias de análise energética e avaliação ambiental para compreender a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Estudos recentes demonstram que a combinação entre modelagem matemática e análise energética permite estimar indicadores relacionados ao consumo de energia, à eficiência produtiva e ao impacto ambiental da produção agrícola. Nesse sentido, a utilização de modelos matemáticos possibilita representar fluxos de energia no sistema produtivo, quantificando as entradas energéticas associadas a insumos, combustíveis e equipamentos, bem como as saídas energéticas relacionadas à produção de biomassa ou alimentos (Mohammadi et al., 2023).

Outro aspecto relevante refere-se à integração da modelagem matemática com metodologias de avaliação ambiental, como a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Essa abordagem possibilita analisar os impactos ambientais associados às diferentes etapas do processo produtivo, desde a obtenção de insumos até a produção final. De acordo com Crippa

(2024), a utilização de modelos matemáticos associada à ACV permite comparar alternativas de produção e apoiar processos de tomada de decisão, considerando indicadores de sustentabilidade ao longo de todo o ciclo de vida. Dessa forma, estudos que combinam modelagem e ACV têm sido empregados para avaliar a sustentabilidade de sistemas produtivos, permitindo identificar oportunidades de melhoria e estratégias mais eficientes sob a perspectiva ambiental.

No caso da produção de milho para silagem, a modelagem matemática pode ser empregada para estruturar dados relacionados às entradas e saídas energéticas do sistema produtivo, permitindo representar matematicamente o consumo de insumos, combustíveis e operações mecanizadas envolvidas no processo agrícola. A partir dessa representação, torna-se possível calcular indicadores de eficiência energética, analisar o comportamento das variáveis do sistema e compreender de forma mais detalhada os fluxos energéticos associados à atividade produtiva.

Nesse contexto, a modelagem matemática desempenha um papel central na análise de sistemas produtivos agrícolas, uma vez que permite estruturar matematicamente os processos envolvidos na produção, integrar dados provenientes de diferentes etapas do sistema e gerar indicadores que auxiliam na avaliação da eficiência produtiva e energética. A utilização dessa abordagem possibilita compreender de forma mais sistemática o funcionamento dos sistemas agrícolas, contribuindo para o desenvolvimento de práticas produtivas mais eficientes e sustentáveis.

Portanto, a aplicação da modelagem matemática em sistemas produtivos agrícolas constitui uma ferramenta relevante para a análise de processos produtivos, permitindo representar matematicamente as interações entre os diferentes componentes do sistema, avaliar o uso de recursos energéticos e subsidiar a tomada de decisões relacionadas ao planejamento e à gestão da produção agrícola. No presente estudo, a modelagem matemática será utilizada para estruturar e interpretar os dados relacionados ao consumo energético da produção de milho para silagem, possibilitando avaliar a eficiência energética do sistema produtivo analisado e compreender as relações entre produtividade, consumo de energia e sustentabilidade agrícola.

3.4 Análise e balanço energético na agricultura

No Brasil, as emissões de gases de efeito estufa são predominantemente provenientes das atividades de mudança de uso da terra e agropecuária. Em 2023, esses dois setores responderam por aproximadamente 74% das emissões nacionais (49% provenientes da mudança de uso da terra e 25% da agropecuária), enquanto o setor de energia, que engloba principalmente a queima de combustíveis fósseis, representou cerca de 19% das emissões totais (Instituto de Energia e Meio Ambiente, 2024).

De acordo com Majeed et al. (2023), a energia exerce papel essencial na satisfação das necessidades humanas básicas e no desenvolvimento das atividades econômicas em diversos setores, como o doméstico, o comercial e o agrícola. Na agricultura, sua utilização está presente em praticamente todas as etapas produtivas, incluindo preparo do solo, semeadura, irrigação,

colheita, transporte, secagem e armazenamento. Essa elevada dependência energética torna o setor vulnerável ao aumento dos custos dos combustíveis fósseis, à escassez de recursos energéticos e aos impactos ambientais associados ao seu uso, reforçando a necessidade de adoção de alternativas mais sustentáveis e economicamente viáveis.

Nesse contexto, Silva e Bueno (2011) destacam que a busca por sistemas de produção sustentáveis tem ganhado relevância tanto no Brasil quanto em âmbito internacional. Tais sistemas procuram conciliar aspectos econômicos, sociais, culturais, ambientais e energéticos, visando não apenas à preservação dos recursos naturais, mas também ao fortalecimento das comunidades rurais e à promoção do desenvolvimento sustentável.

Além de impulsionar o crescimento econômico, a atividade agrícola deve ser analisada sob a perspectiva dos impactos causados ao meio ambiente. Conforme Lage et al. (2017), o uso inadequado dos recursos naturais compromete sua capacidade de renovação e intensifica problemas como poluição do ar e da água, evidenciando a necessidade de práticas produtivas mais equilibradas.

Diante disso, o balanço energético destaca-se como uma importante ferramenta de análise dos sistemas agrícolas, pois permite identificar e quantificar as entradas e saídas de energia envolvidas no processo produtivo. A partir dessa avaliação, torna-se possível determinar o saldo energético da atividade, analisar sua eficiência e identificar as etapas de maior consumo energético (Melo et al., 2007; Dantas et al., 2006).

As entradas energéticas correspondem à energia empregada no sistema produtivo por meio de combustíveis, fertilizantes, sementes, defensivos agrícolas, mão de obra, máquinas e equipamentos utilizados nas operações agrícolas. Já as saídas energéticas referem-se à energia armazenada nos produtos gerados pelo sistema, como grãos, biomassa e silagem produzida ao final do processo agrícola. A comparação entre essas entradas e saídas permite compreender o comportamento energético do sistema produtivo e avaliar seu nível de eficiência.

Para a realização dessa análise, utilizam-se coeficientes energéticos, responsáveis por converter insumos e produtos agrícolas em unidades de energia, geralmente expressas em megajoules (MJ). Esses coeficientes possibilitam comparar diferentes sistemas de produção, avaliar a eficiência energética das atividades agrícolas e identificar os componentes que apresentam maior demanda de energia e maior potencial de impacto ambiental.

Além disso, diferentes indicadores energéticos podem ser utilizados para avaliar o desempenho dos sistemas agrícolas. Entre os principais destacam-se a eficiência energética, o saldo energético, a produtividade energética e a relação entre energia de saída e energia de entrada. Esses indicadores possibilitam identificar o grau de aproveitamento da energia utilizada no sistema produtivo, permitindo avaliar a sustentabilidade e a viabilidade energética das atividades agrícolas.

A eficiência energética representa a relação entre a energia produzida e a energia consumida no sistema agrícola, sendo considerada um importante indicador de sustentabilidade produtiva. Sistemas que apresentam maior eficiência energética tendem a utilizar os recursos

de forma mais racional, reduzindo desperdícios e minimizando impactos ambientais associados ao consumo excessivo de insumos e combustíveis fósseis.

Além da produção de alimentos, a agricultura também apresenta expressivo potencial para geração de energia renovável, tornando-se um elemento estratégico na transição para modelos energéticos mais sustentáveis. Nesse cenário, destaca-se a agricultura energética, que integra a produção agrícola à geração de energia limpa por meio do aproveitamento de biomassa, resíduos agropecuários, biogás, biodiesel e energia solar nas propriedades rurais.

Essa integração contribui para a redução da dependência de combustíveis fósseis, diminuição das emissões de gases de efeito estufa e ampliação da autonomia energética no meio rural. Segundo o portal Energia Move o Mundo, a agricultura energética constitui uma alternativa sustentável capaz de conciliar segurança alimentar, preservação ambiental e desenvolvimento econômico, promovendo maior eficiência produtiva no campo.

De acordo com Guareschi et al. (2021), a eficiência energética evidencia a sustentabilidade dos agrossistemas e contribui para a tomada de decisões relacionadas à redução dos custos de produção e ao uso racional de insumos agrícolas. Os autores observaram que, na cultura do milho, os principais gastos energéticos estão associados ao uso de fertilizantes, herbicidas e combustíveis utilizados nas operações mecanizadas.

No caso específico da produção de milho para silagem, a demanda energética apresenta estreita relação com as operações mecanizadas envolvidas no processo produtivo, como preparo do solo, semeadura, adubação, pulverização, colheita, transporte e armazenamento da silagem. Além disso, a elevada utilização de fertilizantes e combustíveis fósseis contribui significativamente para o aumento das entradas energéticas do sistema agrícola.

A produção de silagem também se caracteriza pela elevada geração de biomassa, tornando relevante a análise da relação entre a energia consumida no processo produtivo e a energia armazenada no produto final (Capellesso, 2013).

Assim, a agricultura pode ser compreendida como um sistema energético aberto, caracterizado pela entrada de energia proveniente de recursos naturais e insumos industriais, seguida de sua transformação em alimentos, fibras e energia renovável. Nesse sentido, a adoção de tecnologias sustentáveis e de fontes renováveis de energia tende a reduzir os custos energéticos da produção agrícola, além de minimizar os impactos ambientais associados às atividades agropecuárias (Dantas et al., 2006).

Além de sua importância como ferramenta de avaliação da sustentabilidade, o balanço energético também pode ser utilizado como instrumento de gestão e planejamento agrícola. A identificação das etapas de maior consumo energético permite orientar estratégias voltadas à melhoria da eficiência produtiva, à redução de custos operacionais e à adoção de práticas agrícolas mais sustentáveis.

Nesse contexto, a análise do balanço energético na produção de milho para silagem permite compreender o comportamento energético do sistema produtivo, identificar os componentes de maior consumo de energia e avaliar a eficiência energética da atividade agrícola

estudada, contribuindo para discussões relacionadas à sustentabilidade e ao uso racional de recursos no meio rural.

3.5 Avaliação do Ciclo de Vida

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia sistemática utilizada para quantificar e avaliar os potenciais impactos ambientais associados a um produto, processo ou serviço ao longo de todo o seu ciclo de vida. Essa abordagem considera todas as etapas envolvidas, desde a extração das matérias-primas, produção, transporte e uso até a disposição final ou reciclagem dos materiais, permitindo uma visão abrangente dos impactos ambientais e evitando a transferência de impactos entre diferentes etapas do sistema produtivo (Hauschild; Rosenbaum; Olsen, 2018).

Na etapa de inventário do ciclo de vida são identificados e quantificados todos os fluxos de entrada e saída do sistema analisado, incluindo consumo de matérias-primas, energia, água, emissões atmosféricas, efluentes e resíduos sólidos. O inventário representa a base quantitativa da ACV, pois reúne os dados necessários para a avaliação dos impactos ambientais.

A avaliação dos impactos do ciclo de vida converte os dados do inventário em indicadores ambientais por meio de métodos de caracterização. Nessa fase, as emissões e os consumos de recursos são associados a diferentes categorias de impacto, como mudanças climáticas, acidificação, eutrofização, toxicidade humana, ecotoxicidade, destruição da camada de ozônio, formação de material particulado, uso da terra, escassez de recursos minerais e fósseis, entre outras. A escolha do método de avaliação depende dos objetivos do estudo e da abrangência desejada.

Por fim, a etapa de interpretação consiste na análise crítica dos resultados obtidos, identificando os processos ou materiais que mais contribuem para os impactos ambientais e verificando a consistência dos dados e das hipóteses adotadas. Essa fase permite a formulação de conclusões e recomendações voltadas à melhoria do desempenho ambiental do sistema estudado.

A ACV tem sido amplamente utilizada como ferramenta de apoio à tomada de decisão em diferentes setores, possibilitando a identificação de oportunidades de redução dos impactos ambientais, o aumento da eficiência no uso de recursos e o desenvolvimento de produtos e processos mais sustentáveis. Além disso, a metodologia contribui para fundamentar estratégias de economia circular, gestão ambiental e produção sustentável, fornecendo informações científicas para subsidiar decisões técnicas e políticas (Hauschild; Rosenbaum; Olsen, 2018).

4 PROBLEMA DE PESQUISA

A produção de silagem de milho é amplamente utilizada em sistemas de produção pecuária, especialmente na alimentação de ruminantes. Entretanto, as diferentes etapas do sistema produtivo, que incluem o preparo do solo, a semeadura, os tratos culturais, a colheita e a ensilagem, demandam o uso significativo de insumos e energia, em grande parte provenientes de fontes não renováveis, como combustíveis fósseis e fertilizantes minerais (Martins, 2015). Esse elevado consumo energético pode aumentar os custos de produção e contribuir para impactos ambientais associados à dependência de recursos fósseis (Camoto, 2013). Nesse contexto, torna-se relevante identificar quais etapas do sistema produtivo apresentam maior intensidade energética e avaliar alternativas que possibilitem a substituição parcial ou total dessas fontes por energias renováveis, contribuindo para a maior sustentabilidade do sistema.

Diante disso, surge o seguinte problema de pesquisa: Qual etapa do sistema produtivo do milho destinado à produção de silagem apresenta maior intensidade energética de fontes não renováveis e, com base nesse resultado, qual alternativa de fonte de energia renovável pode ser tecnicamente recomendada para essa etapa?

5 OBJETIVOS

a) Objetivo geral

Modelar e analisar o consumo energético não renovável nas diferentes etapas da produção de milho para silagem em uma propriedade rural de Minas Gerais.

b) Objetivos específicos

- Quantificar o consumo energético direto e indireto das principais operações agrícolas;
- Calcular a eficiência energética do sistema produtivo;
- Determinar as etapas de maior intensidade energética;
- Realizar a Análise do Ciclo de Vida (ACV) do sistema produtivo, identificando os principais impactos ambientais associados às diferentes etapas da produção;
- Indicar, com base nos resultados do modelo, a etapa prioritária para implementação de fontes de energia renovável.

6 METODOLOGIA

6.1 Delineamento do estudo e definição do sistema

O presente trabalho caracterizou-se como um estudo de caso, de abordagem quantitativa e natureza aplicada (Schneider, Fujii e Corazza, 2017), realizado em uma Propriedade A, localizada em um município do estado de Minas Gerais. O estudo apresentou caráter observacional e descritivo, tendo como foco a análise do consumo energético não renovável nas diferentes etapas de produção do milho para silagem, bem como a avaliação de alternativas para inserção de fontes renováveis no sistema produtivo.

Para a operacionalização da análise proposta, os dados técnicos e operacionais do sistema produtivo foram obtidos por meio de questionário aplicado diretamente ao produtor rural responsável pela área estudada. O instrumento contemplou informações referentes às etapas do processo produtivo, consumo estimado de combustível, utilização de insumos e mão de obra empregada, sendo tais informações utilizadas na parametrização do modelo energético desenvolvido neste trabalho. O questionário encontra-se disponível no Apêndice A.

A pesquisa fundamentou-se na análise energética de sistemas agrícolas, considerando o sistema produtivo do milho como um sistema de entrada–processo–saída de energia. Foram avaliadas as entradas energéticas associadas aos insumos agrícolas, maquinários e implementos, combustíveis e energia elétrica utilizados nas operações mecanizadas, bem como as saídas energéticas representadas pelo produto final: a silagem de planta inteira.

A coleta de dados desta pesquisa foi realizada por meio da combinação de informações obtidas diretamente em campo e dados provenientes da literatura técnica especializada, permitindo a caracterização completa das entradas energéticas do sistema produtivo. Essa estratégia possibilitou integrar medições reais da propriedade estudada com parâmetros consolidados cientificamente, assegurando maior rigor aos cálculos energéticos.

Os dados primários foram obtidos durante o acompanhamento das operações agrícolas na propriedade rural, contemplando o registro do consumo de combustíveis utilizados por tratores, colhedoras de forragem e demais máquinas agrícolas, expresso em litros. Também foram registrados o tipo de combustível empregado, o tempo diário de operação de cada equipamento, em horas, e o número de dias necessários para a execução de cada etapa produtiva. Essas informações possibilitaram determinar a energia direta empregada no sistema, associada principalmente à queima de combustíveis fósseis e ao uso de eletricidade.

Além dos dados coletados em campo, foram considerados coeficientes energéticos associados à produção dos fertilizantes. A utilização desses coeficientes permitiu contabilizar parcelas de energia que não foram diretamente mensuradas na propriedade, mas que compuseram o balanço energético global da cultura.

Todos os valores obtidos, tanto primários quanto secundários, foram convertidos para a unidade energética padrão megajoule (MJ), a fim de garantir a padronização das grandezas

e a comparabilidade entre diferentes fontes de energia e tipos de insumos. Para facilitar a interpretação dos resultados, foram elaborados gráficos e tabelas comparativas, representando a participação relativa de cada etapa no consumo energético total, bem como a relação entre energia consumida e energia produzida pela biomassa.

6.2 Caracterização técnico-operacional do sistema produtivo

A caracterização técnico-operacional do sistema produtivo foi realizada com o objetivo de descrever as condições operacionais da produção de milho para silagem e subsidiar a modelagem matemática da análise energética. O estudo foi conduzido em uma Propriedade A, localizada em um município do estado de Minas Gerais, Brasil, referente à safra 2025-2026, com área cultivada de 5 hectares. As informações que poderiam identificar a propriedade foram suprimidas para preservar o anonimato do produtor e da unidade produtiva.



Figura 1 – Propriedade A

A obtenção dos dados ocorreu por meio da aplicação de um questionário técnico estruturado junto ao produtor rural, permitindo o levantamento detalhado das operações agrícolas, dos equipamentos utilizados, do consumo de insumos e da organização das atividades ao longo do ciclo produtivo. As informações coletadas contemplaram as etapas de preparo do solo, semeadura e adubação, tratos culturais, colheita e processamento, transporte e armazenamento.

No preparo do solo, foi adotado o sistema convencional, com revolvimento da camada superficial do solo. A operação foi realizada de forma mecanizada, utilizando trator Massey

Ferguson 275, com potência de 75 cv, acoplado a uma grade aradora. Foram registrados o tempo de operação, o consumo estimado de diesel e o número de trabalhadores envolvidos.



Figura 2 – Trator Massey Ferguson 275

A semeadura foi realizada de forma mecanizada, utilizando o mesmo conjunto trator-plantadeira. Foram coletadas informações sobre o tempo de operação, o consumo de combustível e as características dos insumos utilizados. As sementes empregadas corresponderam ao híbrido Agrisure Viptera 3 (KWS 9606), com taxa de semeadura de 20 kg ha⁻¹. Simultaneamente, foi realizada a adubação de base com fertilizante NPK 08-28-16, na dose de 400 kg ha⁻¹.



Figura 3 – Sementes Agrisure Viptera 3 (KWS 9606)

Nos tratos culturais, foi realizada apenas a adubação de cobertura, executada manualmente. Foram registradas as quantidades aplicadas de fertilizante NPK 30-00-20, na dosagem de 500 kg ha⁻¹, bem como o tempo de trabalho necessário para a operação. Não foram realizadas pulverizações, irrigação ou aplicações de defensivos agrícolas.

A colheita e o processamento foram realizados de forma mecanizada, no sistema de planta inteira, utilizando ensiladeira tratorizada acionada pela tomada de potência do trator.



Figura 4 – Plantação de milho na etapa dos tratos culturais

Foram levantados dados referentes ao tempo de operação, ao consumo de combustível e ao número de trabalhadores envolvidos.



Figura 5 – Etapa da colheita

O transporte da silagem foi realizado com trator e carreta agrícola, sendo registrados a distância média percorrida, a capacidade de carga, o número de viagens, o tempo operacional e o consumo de combustível.

O armazenamento foi realizado em silo de superfície, com compactação mecanizada por meio de trator. Foram obtidas informações sobre o tempo de operação, o material de vedação, a capacidade do silo e a produção total ensilada.



Figura 6 – Compactação mecanizada da matéria

Os dados obtidos foram organizados em planilhas eletrônicas, com padronização das unidades de medida, possibilitando sua utilização na modelagem matemática determinística. Considerou-se que o consumo energético esteve associado ao tempo de operação dos equipamentos e à quantidade de insumos utilizados, permitindo a quantificação dos fluxos de energia não renovável e a análise da intensidade energética do sistema produtivo.

6.3 Estrutura analítica e parametrização

A modelagem adotada foi determinística, assumindo proporcionalidade direta entre consumo energético e tempo de operação, o que implicou um comportamento linear das variáveis energéticas. Essa simplificação foi considerada adequada para fins de diagnóstico comparativo entre etapas do sistema produtivo, ainda que, na prática, o consumo energético pudesse variar em função de fatores operacionais como carga do equipamento, condições do solo e eficiência mecânica. Variabilidades estocásticas e perdas energéticas não mensuráveis não foram incorporadas ao modelo, sendo reconhecidas como limitações inerentes à abordagem.

Para a realização da análise energética, o sistema produtivo do milho foi dividido em etapas operacionais, de modo que cada fase do cultivo fosse tratada como um subsistema energético. As etapas consideradas foram preparo do solo, semeadura e adubação, tratos culturais, colheita, transporte e armazenamento (ensilagem). No preparo do solo, foram contabilizados o consumo de combustível e o tempo de operação das máquinas. Na semeadura e adubação, foram considerados o consumo de combustível e a energia incorporada aos

fertilizantes e às sementes.

Nos tratos culturais, foram avaliados o consumo de combustível nas operações mecanizadas e a energia incorporada aos fertilizantes aplicados. Por fim, na etapa de colheita e ensilagem, foram registrados o consumo de combustível da colhedora de forragem (que realizou o corte e a trituração simultaneamente) e dos tratores utilizados no transporte e na compactação da massa forrageira no silo. Essa abordagem excluiu a etapa de secagem de grãos, uma vez que o produto foi destinado à conservação úmida na forma de silagem. A partir desses dados, foi estimado o consumo energético de cada etapa e do sistema produtivo como um todo.

Os dados operacionais referentes ao consumo de combustível não foram medidos diretamente durante a execução das operações agrícolas, uma vez que a propriedade não possuía sistema de monitoramento ou registro específico desse parâmetro. Assim, os valores foram estimados pelo proprietário com base na experiência prática, no histórico de utilização das máquinas e na rotina operacional da propriedade, sendo considerados representativos das condições reais do sistema produtivo estudado.

A modelagem matemática desenvolvida neste estudo fundamentou-se na representação do sistema produtivo do milho para silagem como um sistema de entrada–processo–saída de energia. Nessa abordagem, as diferentes fontes de energia empregadas no processo produtivo constituíram as variáveis de entrada do modelo, enquanto as operações agrícolas representaram os mecanismos de transformação energética e a biomassa produzida correspondeu à saída do sistema. A estruturação matemática permitiu estabelecer relações quantitativas entre os insumos consumidos, os fluxos energéticos associados às diferentes etapas produtivas e os indicadores de desempenho energético. Dessa forma, o modelo possibilitou não apenas quantificar o consumo de energia, mas também analisar a influência das variáveis do sistema sobre os resultados obtidos, favorecendo a identificação de etapas críticas e subsidiando avaliações relacionadas à eficiência energética e à sustentabilidade da atividade agrícola.

6.4 Coeficientes e variáveis energéticas

Conforme a metodologia apresentada por Assenheimer, Campos e Gonçalves Júnior (2009), o balanço energético foi determinado por meio da conversão dos insumos utilizados no sistema de produção de milho em unidades energéticas. Para essa conversão, adotaram-se coeficientes energéticos definidos por diferentes autores, descritos na Tabela 1. Ressalta-se que os fertilizantes comerciais utilizados na propriedade (NPK 08-28-16 e NPK 30-00-20) foram decompostos em seus respectivos teores percentuais de nitrogênio (N), fósforo (P_2O_5) e potássio (K_2O), permitindo a aplicação dos coeficientes energéticos individuais apresentados.

Tabela 1 – Entradas energéticas diretas e indiretas do sistema de produção de milho para silagem e seus coeficientes energéticos

Componente	Unidade	Coefficiente energético	Fonte
Energia Direta			
Mão de obra	MJ h ⁻¹	2,20	Martins et al. (2015)
Óleo Diesel	MJ L ⁻¹	35,50	EPE (2024)
Graxa	MJ L ⁻¹	43,38	Campos et al. (2004)
Lubrificante	MJ L ⁻¹	39,43	Campos et al. (2004)
Adubação de base (N)	MJ kg ⁻¹	74,00	Romanelli e Milan (2005)
Adubação de base (P ₂ O ₅)	MJ kg ⁻¹	12,56	Romanelli e Milan (2005)
Adubação de base (K ₂ O)	MJ kg ⁻¹	6,70	Romanelli e Milan (2005)
Sementes de milho	MJ kg ⁻¹	18,71	Martins et al. (2015)
Energia Indireta			
Maquinários	MJ kg ⁻¹	69,82	Martins et al. (2015)
Implementos	MJ kg ⁻¹	57,20	Martins et al. (2015)

Na modelagem da energia contida na biomassa ensilada (energia de saída), foi adotado o coeficiente energético de 17,32 MJ kg⁻¹ em base de matéria seca, conforme relatado por Martins et al. (2015) em estudo sobre análise energética de milho para silagem. Considerando o teor médio de matéria seca de 35% na silagem produzida na propriedade analisada, o coeficiente foi ajustado para 6,06 MJ kg⁻¹ em base de matéria natural, por meio da multiplicação pelo teor de matéria seca.

$$E_{MN} = 17,32 \times 0,35 = 6,06 \text{ MJ kg}^{-1}, \quad (6.1)$$

onde E_{MN} representa a energia em base de matéria natural.

6.5 Formulação matemática e indicadores de desempenho

Em relação ao cálculo da energia direta associada às operações mecanizadas, foram consideradas duas abordagens, de acordo com a fonte energética utilizada no funcionamento das máquinas e equipamentos. A Abordagem 1 baseia-se na quantificação do consumo de combustível durante as operações agrícolas. Para isso, foi realizada a coleta em campo do volume de combustível consumido por cada máquina ou equipamento, expresso em litros (Q), sendo posteriormente multiplicado pelo respectivo poder calorífico ou coeficiente energético do combustível, em MJ L⁻¹ (PC), conforme apresentado na Equação 1.

A Abordagem 2 refere-se ao consumo de energia elétrica por máquinas e equipamentos utilizados no processo produtivo. Nesse caso, a energia consumida foi estimada a partir da multiplicação da potência elétrica do equipamento, em quilowatts (PE), pelo tempo de operação, em horas (t), em cada etapa do processo produtivo analisado, conforme apresentado na Equação 2. Dessa forma, foi possível estimar a energia direta empregada nas operações mecanizadas ao longo do sistema de produção.

$$DE_{(1)} = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot PC_i, \quad (\text{Eq. 1})$$

$$DE_{(2)} = \sum_{j=1}^k PE_j \cdot t_j, \quad (\text{Eq. 2})$$

em que:

- $DE_{(1)}$ é a demanda de energia calculada pela Abordagem 1 (MJ);
- Q_i é a quantidade do combustível i (L);
- PC_i é o coeficiente energético do combustível i (MJ L^{-1});
- $DE_{(2)}$ é a demanda de energia calculada pela Abordagem 2 (kWh);
- PE_j é a potência elétrica da máquina ou do equipamento elétrico j (kW);
- t_j é o tempo de utilização da máquina ou do equipamento elétrico j (h);
- n representa o número de tipos distintos de combustíveis;
- k representa o número de tipos distintos de máquinas ou equipamentos elétricos.

Além do consumo de combustíveis e de energia elétrica, foi considerada também a energia associada à mão de obra empregada nas diferentes etapas do sistema produtivo, classificada como energia direta. A quantificação dessa energia foi realizada com base no número de trabalhadores envolvidos em cada operação, no tempo de execução das atividades (em horas) e em um coeficiente médio de demanda energética metabólica por trabalhador, obtido na literatura técnica especializada.

A energia associada à mão de obra foi determinada conforme a Equação 3:

$$E_{MO} = N \cdot t \cdot C_{MO}, \quad (\text{Eq. 3})$$

onde:

- E_{MO} : energia associada à mão de obra (MJ);
- N : número de trabalhadores envolvidos na operação;
- t : tempo de trabalho (h);
- C_{MO} : coeficiente energético metabólico médio por trabalhador ($\text{MJ} \cdot \text{h}^{-1}$).

A inclusão dessa variável permite ampliar a abrangência da análise energética, contemplando também a contribuição do trabalho humano no consumo total de energia do sistema produtivo.

O consumo de lubrificantes e graxa foi determinado conforme Balastreire (1990). O consumo de lubrificantes é calculado de acordo com a Equação 4:

$$C_l = 0,00059 \cdot H + 0,02169, \quad (\text{Eq. 4})$$

em que:

- C_l : consumo de lubrificante (L h^{-1});
- H : potência nominal do motor do trator (kW).

Para a determinação do consumo total de lubrificante, o valor de C_l foi multiplicado pelo tempo de operação do equipamento, resultando no consumo em litros. Posteriormente, para a obtenção do consumo energético associado, o consumo total de lubrificante foi multiplicado pelo coeficiente energético do lubrificante, expresso em MJ L^{-1} , conforme apresentado na Equação 5:

$$E_l = C_l \cdot t \cdot CE_l, \quad (\text{Eq. 5})$$

em que:

- E_l : consumo de energia do lubrificante (MJ);
- t : tempo de operação (h);
- CE_l : coeficiente energético do lubrificante (MJ L^{-1}).

O consumo de graxa foi estimado com base em coeficientes técnicos reportados na literatura, adotando-se o valor de 0,5 kg a cada 10 horas de operação do trator. Com o objetivo de garantir a compatibilidade dimensional com o coeficiente energético utilizado no presente estudo, expresso em MJ L^{-1} , procedeu-se à conversão do consumo de graxa de unidade de massa para volume. Para tanto, foi considerada uma densidade média de $0,90 \text{ kg L}^{-1}$ para graxas lubrificantes (Hyma, 2025).

Inicialmente, determinou-se o consumo horário de graxa, conforme a Equação 6:

$$C_g = \frac{0,5}{10} \cdot \frac{1}{\rho_g} = \frac{0,5}{10} \cdot \frac{1}{0,90} = 0,0556, \quad (\text{Eq. 6})$$

em que:

- C_g : consumo de graxa (L h^{-1});
- ρ_g : densidade da graxa (kg L^{-1}).

Para a determinação do consumo total de graxa, o valor de C_g foi multiplicado pelo tempo de operação do equipamento. Posteriormente, para a obtenção do consumo energético associado, o consumo total de graxa foi multiplicado pelo coeficiente energético da graxa, conforme apresentado na Equação 7:

$$E_g = 0,0556 \cdot t \cdot CE_g, \quad (\text{Eq. 7})$$

em que:

- E_g : consumo de energia da graxa (MJ);
- t : tempo de operação (h);
- CE_g : coeficiente energético da graxa (MJ L^{-1}).

A energia indireta associada ao uso de máquinas e implementos agrícolas foi estimada a partir da energia incorporada na fabricação desses equipamentos. Para o cálculo da energia consumida, adotou-se a metodologia proposta por Angonese et al. (2006) e Riquetti, Benez e Silva (2012), baseada no método de depreciação energética.

Essa abordagem consiste em distribuir a energia incorporada na fabricação dos equipamentos ao longo de sua vida útil e relacioná-la ao tempo efetivo de uso nas operações agrícolas. Dessa forma, é possível estimar a parcela de energia indireta associada às atividades mecanizadas no sistema de produção.

Para o cálculo, foram considerados o peso do equipamento, o coeficiente energético de fabricação, a vida útil em horas de trabalho, o tempo de utilização na operação e a área total cultivada. A energia indireta foi determinada conforme a Equação 8.

$$E_{im} = \frac{M \cdot C_e \cdot T_u}{V_u}, \quad (\text{Eq. 8})$$

em que:

- E_{im} : energia indireta associada às máquinas e implementos (MJ);
- M : massa do implemento ou máquina (kg);
- C_e : coeficiente energético de fabricação do equipamento (MJ kg^{-1});
- T_u : tempo de uso do equipamento na operação (h);
- V_u : vida útil do equipamento (h).

A energia de saída associada ao produto (silagem) será estimada a partir da produção total de massa verde obtida na propriedade. Para a determinação da matéria seca, será adotado o valor de 35%, percentual informado pelo produtor como representativo da silagem de milho produzida na área estudada.

A massa de matéria seca será obtida pela multiplicação da produção total de massa verde pelo teor médio de matéria seca adotado. Posteriormente, esse valor será multiplicado pelo coeficiente energético médio da matéria seca do milho para silagem, expresso em ($MJ \cdot kg^{-1}$), também obtido em fontes bibliográficas.

A estimativa da energia total contida na silagem será realizada conforme a Equação 9:

$$E_{\text{Silagem}} = M_{\text{MS}} \cdot E_{\text{MS}}, \quad (\text{Eq. 9})$$

onde:

- E_{Silagem} = energia total contida na biomassa ensilada (MJ);
- M_{MS} = massa total da silagem (kg);
- E_{MS} = coeficiente energético da matéria seca do milho para silagem ($MJ \cdot kg^{-1}$).

Essa abordagem é compatível com estudos de análise energética agrícola que utilizam parâmetros médios consolidados na literatura quando não há medição laboratorial direta, garantindo consistência metodológica ao modelo proposto.

A fim de analisar o sistema produtivo do milho para silagem no estudo de caso proposto, será avaliada a eficiência energética. A eficiência energética (η) será calculada pela relação entre a energia total contida na biomassa ensilada e a energia total consumida no processo produtivo, abrangendo desde a etapa de preparo do solo até a colheita e fechamento do silo.

A formulação adotada baseia-se na abordagem proposta por Angonese et al. (2006) e Melo et al. (2007), que definem a eficiência energética (η) como a razão entre a energia de saída do sistema e a energia total de entrada. Nos estudos desses autores, a energia de saída é geralmente obtida pela soma das energias do produto principal e dos resíduos agrícolas. Entretanto, no presente trabalho, considerando que a produção é destinada à silagem de planta inteira, não há distinção entre produto e resíduo, pois toda a biomassa vegetal colhida (grãos, folhas, colmo e espiga) constitui o produto final. Assim, a energia de saída foi considerada como a energia total da biomassa vegetal ensilada.

O cálculo segue a Equação 10:

$$\eta = \frac{E_{\text{Silagem}}}{\sum E_{\text{Entrada}}}, \quad (\text{Eq. 10})$$

em que:

- $\sum E_{\text{Entrada}} = \sum (E_{\text{DEntrada}} + E_{\text{IEntrada}} + E_{\text{MO}})$;
- E_{Silagem} = estimativa da energia contida na biomassa vegetal ensilada (planta inteira);
- E_{DEntrada} = estimativa de energia direta (combustíveis e eletricidade);
- E_{IEntrada} = estimativa de energia indireta (fertilizantes, defensivos agrícolas e sementes);

- E_{MO} = estimativa de energia associada à mão de obra;
- $E_{Entrada}$ = estimativa da energia total consumida no processo produtivo.

A eficiência energética (η) representa a razão entre a energia útil obtida no sistema produtivo e a energia total consumida ao longo do processo de produção agrícola. Sua interpretação permite avaliar o nível de sustentabilidade energética do sistema analisado.

- $\eta > 1$
Indica que o sistema é **energeticamente eficiente**, ou seja, a energia contida na biomassa ensilada é maior que a energia consumida durante o processo produtivo. Isso caracteriza um sistema sustentável sob o ponto de vista energético.
- $\eta \approx 1$
Representa um sistema **energeticamente equilibrado**, em que a energia produzida é praticamente igual à energia consumida. Há pouca margem de ganho energético.
- $\eta < 1$
Indica um sistema **energeticamente ineficiente**, pois o consumo de energia é maior que a energia gerada na biomassa ensilada. Nesse caso, o processo produtivo apresenta elevado gasto energético e menor sustentabilidade.

Assim, quanto maior o valor de η , maior é a eficiência energética do sistema agrícola, evidenciando melhor aproveitamento dos recursos energéticos e menor impacto ambiental.

Na sequência, será analisada a **intensidade energética** de cada etapa. Esse indicador permite identificar a participação relativa de cada operação no consumo energético global do sistema, sendo fundamental para identificar gargalos, como o consumo intensivo de diesel na colheita e compactação da silagem.

Dessa forma, a Equação 11 descreve a intensidade energética de cada etapa em termos percentuais:

$$IE_i(\%) = \frac{E_i}{E_{total}} \times 100, \quad (\text{Eq. 11})$$

onde:

- $IE_i(\%)$ representa a intensidade energética da etapa i , em porcentagem;
- E_i é a energia consumida na etapa i do processo produtivo (MJ);
- E_{total} é a energia total de entrada do sistema produtivo (MJ).

A partir da determinação dos indicadores energéticos propostos, será possível identificar as etapas de maior intensidade energética no sistema produtivo, fornecendo subsídios

quantitativos para análises posteriores acerca da eficiência e sustentabilidade do processo de produção de silagem.

A validação do modelo foi realizada por meio da consistência metodológica dos coeficientes energéticos adotados e da comparação conceitual dos resultados obtidos com estudos similares disponíveis na literatura especializada. Os coeficientes utilizados para combustíveis, fertilizantes, sementes, mão de obra e demais componentes energéticos foram extraídos de trabalhos científicos amplamente empregados em pesquisas de análise energética agrícola, conferindo confiabilidade às estimativas realizadas. Além disso, os indicadores calculados, como consumo energético total, participação relativa das etapas produtivas e eficiência energética do sistema, apresentaram comportamento compatível com resultados reportados em estudos semelhantes sobre a cultura do milho e sistemas agrícolas mecanizados. Dessa forma, considera-se que o modelo representa adequadamente a dinâmica energética do sistema analisado, constituindo uma ferramenta válida para a interpretação dos fluxos energéticos e para a avaliação da eficiência energética da produção de milho para silagem.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 Caracterização e Análise das Entradas Energéticas do Sistema

A caracterização das entradas energéticas do sistema produtivo constitui uma etapa fundamental para a compreensão do comportamento energético global da produção de milho para silagem. Essa análise permite identificar não apenas os elementos responsáveis pelo consumo de energia, mas também a forma como esses elementos se distribuem e influenciam o balanço energético do sistema.

Inicialmente, foram identificados os equipamentos agrícolas utilizados ao longo das diferentes operações do processo produtivo. Para a quantificação da contribuição energética desses equipamentos, foram considerados parâmetros técnicos fundamentais, como a massa e a vida útil operacional. Esses parâmetros permitem estimar a energia incorporada por unidade de uso ao longo do ciclo produtivo, sendo amplamente utilizados em estudos de análise energética.

A Tabela 2 apresenta os equipamentos utilizados no sistema produtivo, bem como os respectivos valores de vida útil e massa.

Tabela 2 – Vida útil e massa dos equipamentos utilizados no sistema de produção

Equipamento	Vida útil (h)	Massa (kg)
Trator Massey Ferguson 275 (4x4)	15000	4050
Grade Aradora Tatu Marchesan 16 discos	3000	2118
Plantadeira Tatu Marchesan 3 linhas	2000	760
Ensiladeira Tratorizada JF 90	2000	320
Carreta agrícola de 5 toneladas	3000	1500

Os dados referentes à massa e à vida útil dos equipamentos apresentados na Tabela 2 foram obtidos a partir de informações técnicas disponibilizadas pelos próprios fabricantes em seus respectivos catálogos, fichas técnicas e páginas oficiais. A utilização dessas fontes visa garantir a confiabilidade e a representatividade dos dados empregados no estudo. As referências completas dos documentos e sítios eletrônicos consultados encontram-se listadas na seção de referências deste trabalho.

A análise dos dados evidencia que o trator apresenta a maior massa e a maior vida útil operacional entre os equipamentos avaliados, características que implicam maior incorporação de energia indireta ao sistema. Esse comportamento está associado ao fato de que equipamentos mais robustos concentram maior quantidade de energia em sua fabricação, a qual é distribuída ao longo de seu tempo de utilização.

Por outro lado, os implementos agrícolas apresentam, em geral, menores valores de massa e vida útil variável, dependendo das condições de uso e das características construtivas. Apesar disso, sua contribuição para o consumo energético não pode ser negligenciada, uma vez que estão diretamente associados às diferentes operações.

Com base nesses parâmetros, foi realizada, neste trabalho, uma análise qualitativa da

contribuição relativa dos equipamentos na energia indireta. Essa classificação considerou dois fatores principais: (i) a frequência de utilização de cada equipamento ao longo das operações agrícolas e (ii) a intensidade energética associada a essas operações.

Para fins de padronização e melhor interpretação dos resultados, adotou-se uma classificação em três níveis: alta, média e baixa participação. Equipamentos com maior tempo de uso e maior demanda energética foram classificados como de alta participação, enquanto aqueles com menor frequência de utilização ou menor consumo energético foram classificados como de média ou baixa participação, conforme sua relevância.

Ressalta-se que essa classificação possui caráter comparativo e interpretativo, não estando vinculada a um critério quantitativo padronizado na literatura, sendo proposta como uma ferramenta auxiliar para a compreensão do comportamento energético do sistema.

Tabela 3 – Participação dos equipamentos na energia indireta do sistema

Equipamento	Contribuição relativa
Trator Massey Ferguson 275 (4x4)	Alta participação
Grade Aradora Tatu Marchesan 16 discos	Média participação
Plantadeira Tatu Marchesan 3 linhas	Baixa participação
Ensiladeira Tratorizada JF 90	Baixa participação
Carreta agrícola de 5 toneladas	Média participação

Além dos equipamentos, foram considerados os demais insumos empregados nas operações produtivas, como fertilizantes, combustíveis e sementes, os quais também contribuem de forma significativa para o consumo energético total do sistema. A integração dessas informações possibilita a construção do balanço energético, etapa essencial para as análises quantitativas e matemáticas desenvolvidas nas seções seguintes.

7.2 Energia Total de Entrada

A energia total de entrada do sistema produtivo foi analisada a partir da decomposição das contribuições energéticas em duas categorias principais: **energia direta** e **energia indireta**, conforme definido na metodologia.

A distribuição percentual dessas contribuições é apresentada na Figura 7.

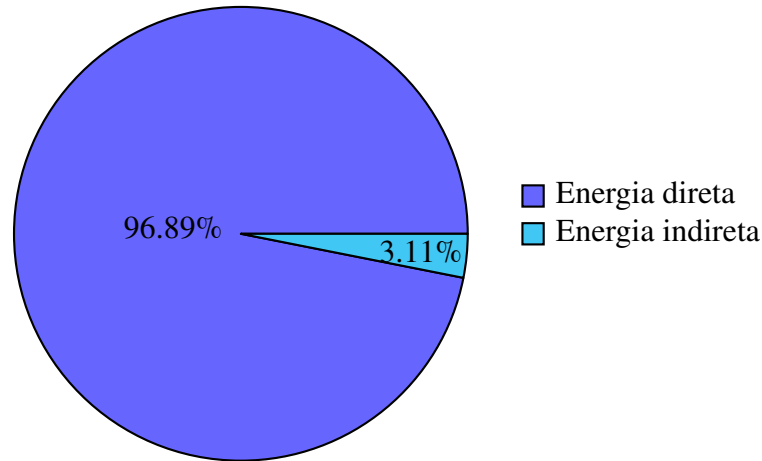


Figura 7 – Distribuição percentual da energia total de entrada

A partir dos cálculos realizados, obteve-se:

$$E_{\text{direta}} = 107.362,30 \text{ MJ}, \quad (7.1)$$

$$E_{\text{indireta}} = 3.447,54 \text{ MJ}. \quad (7.2)$$

A energia total de entrada é dada por:

$$E_{\text{total}} = E_{\text{direta}} + E_{\text{indireta}} = 110.809,84 \text{ MJ}. \quad (7.3)$$

A participação relativa de cada componente é:

$$I_{\text{direta}} = \frac{107.362,30}{110.809,84} \times 100 = 96,89\%, \quad (7.4)$$

$$I_{\text{indireta}} = \frac{3.447,54}{110.809,84} \times 100 = 3,11\%. \quad (7.5)$$

Observa-se uma predominância expressiva da energia direta, responsável por aproximadamente **96,89%** do consumo energético total, evidenciando forte dependência de insumos energéticos utilizados diretamente nas operações agrícolas.

A energia direta compreende os consumos associados ao uso de combustíveis, lubrificantes, graxa, mão de obra e insumos agrícolas, enquanto a energia indireta está relacionada à energia incorporada na fabricação de máquinas e implementos.

Do ponto de vista matemático, a relação entre energia direta e indireta é dada por:

$$\frac{E_{\text{direta}}}{E_{\text{indireta}}} = \frac{107.362,30}{3.447,54} = 31,14, \quad (7.6)$$

indicando que a energia direta é aproximadamente **31 vezes superior** à energia indireta.

Esse resultado evidencia que o consumo energético do sistema está fortemente concentrado em fluxos diretos, especialmente aqueles associados ao uso de combustíveis e insumos agrícolas.

Portanto, a análise da energia de entrada demonstra que o sistema produtivo apresenta elevada dependência de energia direta, sendo essa uma variável-chave para estratégias de otimização energética e aumento da sustentabilidade.

7.2.1 Análise por etapa do sistema produtivo

7.2.1.1 Preparo do solo

Na etapa de **preparo do solo**, o consumo energético total foi de **1.750,00 MJ**, resultante da soma entre energia direta e indireta.

Tabela 4 – Distribuição do consumo energético na etapa de preparo do solo

Categoria	Componente	Energia (MJ)	Participação (%)
Energia direta	Óleo diesel	1.420,00	81,14
	Mão de obra	11,00	0,63
	Graxa	12,16	0,69
	Lubrificante	10,69	0,61
	Total	1.453,80	83,07
Energia indireta	Máquinas	94,26	5,39
	Implementos	205,92	11,54
	Total	296,17	16,93
Energia total		1.750,00	100,00

A energia direta correspondeu a **1.453,80 MJ**, sendo que, desse total, aproximadamente **1.420,00 MJ** estão associados ao consumo de óleo diesel, evidenciando que o combustível é o principal responsável pelo dispêndio energético nessa etapa. Por sua vez, a energia indireta apresentou valor de **296,17 MJ**, relacionada principalmente à energia incorporada às máquinas e implementos agrícolas utilizados na operação.

Além disso, observa-se que o óleo diesel representa cerca de **97,67%** da energia direta:

$$\frac{1.420}{1.453,80} \times 100 = 97,67\% \quad (7.7)$$

o que reforça sua relevância como principal componente energético dessa etapa.

7.2.1.2 Semeadura e adubação

Na etapa de **semeadura e adubação**, o consumo energético total foi de **25.208,11 MJ**, resultante da soma entre energia direta e indireta.

Tabela 5 – Distribuição do consumo energético na etapa de semeadura e adubação

Categoria	Componente	Energia (MJ)	Participação (%)
Energia direta	Óleo diesel	3.988,00	15,82
	Mão de obra	15,40	0,06
	Graxa	16,88	0,07
	Lubrificante	14,97	0,06
	N (adubação de base)	11.840,00	46,97
	P ₂ O ₅ (adubação de base)	7.033,60	27,90
	K ₂ O (adubação de base)	2.144,00	8,50
	Semente de milho	1.871,00	7,42
Total		24.924,00	98,87
Energia indireta	Máquinas	131,96	0,52
	Implementos	153,15	0,61
	Total	284,11	1,13
Energia total		25.208,00	100,00

A energia direta correspondeu a **24.924,00 MJ**, enquanto a energia indireta apresentou valor de **284,11 MJ**, estando esta última associada à energia incorporada às máquinas e implementos utilizados na operação. Os resultados evidenciam uma predominância ainda mais acentuada da energia direta, sendo aproximadamente **87,7 vezes** superior à energia indireta nessa etapa.

Dessa forma, observa-se que apenas o nitrogênio é responsável por aproximadamente **46,97%** de toda a energia direta da etapa, evidenciando seu elevado coeficiente energético.

Em contraste com a etapa de preparo do solo, na qual o consumo de combustível apresentou maior relevância, na semeadura e adubação a principal demanda energética está associada aos insumos agrícolas, especialmente aos fertilizantes.

Do ponto de vista matemático, a soma das contribuições energéticas de N, P₂O₅ e K₂O corresponde a aproximadamente:

$$\frac{11.840 + 7.033,60 + 2.144}{24.924} \times 100 = 84,34\%, \quad (7.8)$$

indicando que os fertilizantes representam mais de **84%** da energia direta dessa etapa.

Portanto, a etapa de semeadura e adubação caracteriza-se por uma forte dependência energética dos insumos químicos, com destaque para o nitrogênio, que se configura como o principal responsável pelo consumo energético elevado, superando significativamente a contribuição do combustível utilizado nas operações mecanizadas.

7.2.1.3 Tratos culturais

Na etapa de **tratos culturais**, o consumo energético total foi de **58.887,00 MJ**, sendo integralmente composto por **energia direta**, uma vez que não houve utilização de máquinas ou implementos agrícolas nessa fase.

Tabela 6 – Distribuição do consumo energético na etapa de tratos culturais

Categoria	Componente	Energia (MJ)	Participação (%)
Energia direta	Óleo diesel	0,00	0,00
	Mão de obra	37,40	0,06
	Graxa	0,00	0,00
	Lubrificante	0,00	0,00
	N (adubação de base)	55.500,00	94,25
	P ₂ O ₅ (adubação de base)	0,00	0,00
	K ₂ O (adubação de base)	3.350,00	5,69
	Semente de milho	0,00	0,00
Total		58.887,40	100,00
Energia indireta	Máquinas	0,00	0,00
	Implementos	0,00	0,00
	Total	0,00	0,00
Energia total		58.887,40	100,00

Esse resultado evidencia que toda a demanda energética da etapa está associada exclusivamente ao uso de insumos agrícolas e mão de obra.

O elevado consumo energético observado nessa fase está diretamente relacionado à aplicação de fertilizantes do tipo NPK 30-00-20, caracterizado por apresentar **30% de nitrogênio** em sua composição. Considerando que o nitrogênio possui elevado coeficiente energético, sua aplicação resulta em um aumento significativo da energia incorporada ao sistema.

Além disso, a ausência de fósforo (P₂O₅) na formulação implica que a maior parte da energia do fertilizante está concentrada no nitrogênio e no potássio (K₂O), sendo o primeiro o principal responsável pelo elevado consumo energético.

Do ponto de vista comparativo, observa-se que essa etapa apresenta consumo energético superior às demais fases do sistema produtivo, mesmo sem a utilização de máquinas. Esse comportamento evidencia que a energia indireta associada aos equipamentos possui menor impacto relativo quando comparada à energia incorporada aos fertilizantes.

Sob a perspectiva matemática, o resultado demonstra que o sistema apresenta alta sensibilidade à variável “quantidade de nitrogênio aplicado”. Pequenas variações na dosagem desse insumo podem provocar alterações significativas no consumo energético total, caracterizando-o como a variável dominante do modelo energético.

Portanto, a etapa de tratos culturais constitui o principal ponto crítico do sistema produtivo em termos energéticos, sendo fortemente influenciada pela aplicação de fertilizantes nitrogenados, os quais, devido ao seu elevado custo energético de produção, elevam significativamente a demanda energética total do sistema.

7.2.1.4 Colheita

Na etapa de **colheita**, o consumo energético total foi de **12.113,10 MJ**, resultante da soma entre energia direta e indireta.

A energia direta correspondeu a **11.049,00 MJ**, enquanto a energia indireta apresentou

valor de **1.064,10 MJ**, associada à energia incorporada aos equipamentos utilizados, como trator e colhedora.

Tabela 7 – Distribuição do consumo energético na etapa de colheita

Categoria	Componente	Energia (MJ)	Participação (%)
Energia direta	Óleo diesel	10.792,00	89,09
	Mão de obra	83,60	0,69
	Graxa	91,66	0,76
	Lubrificante	81,26	0,67
	N (adubação de base)	0,00	0,00
	P ₂ O ₅ (adubação de base)	0,00	0,00
	K ₂ O (adubação de base)	0,00	0,00
	Semente	0,00	0,00
	Total	11.048,52	91,21
Energia indireta	Máquinas	716,35	5,91
	Implementos	347,78	2,87
	Total	1.064,13	8,79
Energia total		12.112,65	100,00

Os resultados evidenciam a predominância da energia direta, que é aproximadamente **10,38 vezes** superior à energia indireta nessa etapa.

Do total de energia direta, destaca-se a contribuição do consumo de combustível, com **10.792,00 MJ**, o que corresponde a:

$$\frac{10.792}{11.049} \times 100 = 97,67\% \quad (7.9)$$

Esse resultado demonstra que o óleo diesel é o principal responsável pela demanda energética da etapa de colheita.

A elevada participação do combustível está diretamente associada ao alto grau de mecanização dessa operação, que envolve o uso contínuo de tratores e colhedoras durante o processo de ensilagem. Nessa etapa, o milho é simultaneamente colhido e processado, exigindo maior potência e, consequentemente, maior consumo de energia.

Do ponto de vista comparativo, observa-se que, diferentemente das etapas de semeadura e tratamentos culturais, nas quais os fertilizantes dominam o consumo energético, na colheita a principal fonte de energia está associada às operações mecanizadas.

Portanto, a etapa de colheita caracteriza-se por elevada dependência de energia direta proveniente de combustível fóssil, evidenciando o impacto da mecanização no consumo energético do sistema produtivo.

7.2.1.5 Transporte

Na etapa de **transporte**, o consumo energético total foi de **6.764,03 MJ**, resultante da soma entre energia direta e indireta.

A energia direta correspondeu a **5.815,00 MJ**, enquanto a energia indireta apresentou valor de **949,03 MJ**, associada à energia incorporada aos equipamentos utilizados no transporte.

Tabela 8 – Distribuição do consumo energético na etapa de transporte

Categoria	Componente	Energia (MJ)	Participação (%)
Energia direta	Óleo diesel	5.680,00	83,97
	Mão de obra	44,00	0,65
	Graxa	48,239	0,71
	Lubrificante	42,77	0,63
	N (adubação de base)	0,00	0,000
	P ₂ O ₅ (adubação de base)	0,00	0,000
	K ₂ O (adubação de base)	0,00	0,000
	Semente	0,00	0,000
Total		5.815,00	85,97
Energia indireta	Máquinas	377,03	5,57
	Implementos	572,00	8,46
	Total	949,03	14,03
Energia total		6.764,04	100,00

Os resultados evidenciam a predominância da energia direta, que é aproximadamente **6,13 vezes** superior à energia indireta nessa etapa.

Do total de energia direta, destaca-se a contribuição do consumo de combustível, com **5.580,00 MJ**, o que corresponde a:

$$\frac{5.580}{5.815} \times 100 = 95,96\%. \quad (7.10)$$

Esse resultado demonstra que o combustível é o principal responsável pela demanda energética da etapa de transporte.

A elevada participação do combustível está diretamente associada ao deslocamento da silagem até o local de armazenamento, realizado por meio de tratores acoplados a carretas agrícolas, exigindo consumo contínuo de energia ao longo do percurso.

Do ponto de vista comparativo, essa etapa apresenta comportamento semelhante ao da colheita, sendo ambas caracterizadas pela predominância do consumo de combustível. No entanto, o transporte apresenta menor consumo energético total, devido à menor exigência de potência em relação às operações de colheita.

Portanto, a etapa de transporte caracteriza-se por forte dependência de energia direta proveniente de combustível fóssil, reforçando o impacto das operações mecanizadas no consumo energético do sistema produtivo.

7.2.1.6 Armazenamento

Na etapa de **armazenamento**, o consumo energético total foi de **6.087,63 MJ**, resultante da soma entre energia direta e indireta.

A energia direta correspondeu a **5.233,50 MJ**, enquanto a energia indireta apresentou valor de **854,13 MJ**, associada à energia incorporada aos equipamentos utilizados no processo.

Tabela 9 – Distribuição do consumo energético na etapa de armazenamento

Categoria	Componente	Energia (MJ)	Participação (%)
Energia direta	Óleo diesel	5.112,00	83,98
	Mão de obra	39,60	0,65
	Graxa	43,42	0,71
	Lubrificante	38,49	0,63
	N (adubação de base)	0,00	0,00
	P ₂ O ₅ (adubação de base)	0,00	0,00
	K ₂ O (adubação de base)	0,00	0,00
	Semente	0,00	0,00
	Total	5.233,51	85,98
Energia indireta	Máquinas	339,33	5,58
	Implementos	514,80	8,45
	Total	854,13	14,02
Energia total		6.087,64	100,00

Os resultados evidenciam a predominância da energia direta, cujo valor é aproximadamente **6,13 vezes** superior ao da energia indireta.

Entre os componentes da energia direta, destaca-se o consumo de óleo diesel, responsável por **5.112,00 MJ**, o que corresponde a:

$$\frac{5.112}{5.233,50} \times 100 = 97,68\% \quad (7.11)$$

da energia direta, e a aproximadamente **83,98%** da energia total consumida na etapa de armazenamento.

Os demais componentes da energia direta apresentaram participações reduzidas, sendo a mão de obra responsável por **0,65%**, a graxa por **0,71%** e os lubrificantes por **0,63%** do consumo energético total. As entradas relacionadas aos fertilizantes e sementes não apresentaram contribuição energética nessa etapa.

No que se refere à energia indireta, os implementos agrícolas contribuíram com **514,80 MJ (8,45%)**, enquanto as máquinas responderam por **339,33 MJ (5,58%)** do consumo total.

Dessa forma, a etapa de armazenamento caracteriza-se pela predominância da energia direta, com forte dependência do consumo de combustível, evidenciando que o óleo diesel constitui o principal insumo energético do processo. Embora a energia incorporada em máquinas e implementos apresente participação relevante, sua contribuição permanece significativamente inferior àquela associada ao combustível.

7.2.2 Análise global das entradas energéticas

A análise global das entradas energéticas permite compreender o comportamento do sistema produtivo como um todo, evidenciando os principais fatores responsáveis pelo consumo energético em cada etapa.

De modo geral, observa-se que o sistema apresenta dois padrões distintos de consumo energético: um associado ao uso de combustível em operações mecanizadas e outro relacionado à energia incorporada aos fertilizantes, especialmente o nitrogênio.

Na etapa de **preparo do solo**, o elevado consumo energético está diretamente relacionado ao uso intensivo de óleo diesel. Esse comportamento é explicado pelo fato de que operações como aração e gradagem exigem alta potência dos tratores, implicando maior consumo de combustível por unidade de tempo. Do ponto de vista matemático, o consumo energético nessa etapa é proporcional ao tempo de operação e à potência demandada, o que justifica os valores elevados observados.

Na **semeadura e adubação**, destaca-se o elevado consumo energético associado à adubação nitrogenada, com **11.840 MJ**. Esse valor elevado está relacionado ao alto coeficiente energético do nitrogênio, decorrente do processo industrial de sua produção. Dessa forma, mesmo pequenas quantidades aplicadas no campo representam grande incorporação de energia ao sistema.

Esse comportamento é ainda mais acentuado na etapa de **tratos culturais**, na qual o consumo energético atingiu **58.887 MJ**, sendo fortemente influenciado pela aplicação de fertilizantes com maior teor de nitrogênio. A elevada participação desse elemento faz com que essa etapa seja a mais intensiva energeticamente do sistema, evidenciando que a energia dos insumos agrícolas pode superar significativamente a energia associada às operações mecanizadas.

Os fertilizantes nitrogenados apresentam elevada participação no consumo de energia não renovável devido à intensidade energética de seu processo de fabricação. A produção desses fertilizantes baseia-se principalmente na síntese de amônia pelo processo Haber-Bosch, que requer elevadas temperaturas e pressões, demandando grande quantidade de energia industrial. Além disso, o gás natural é utilizado tanto como fonte energética quanto como matéria-prima para a obtenção do hidrogênio empregado na síntese da amônia. Dessa forma, a fabricação de fertilizantes nitrogenados possui forte dependência de combustíveis fósseis, resultando em elevados coeficientes energéticos quando comparados a outros insumos agrícolas (Cardoso et. al, 2025).

Consequentemente, a energia incorporada aos fertilizantes nitrogenados pode superar a energia consumida diretamente pelos combustíveis utilizados nas operações mecanizadas, tornando esse insumo um dos principais responsáveis pela demanda de energia não renovável nos sistemas de produção agrícola.

Na etapa de **colheita**, observa-se novamente a predominância do consumo de combustível, com aproximadamente **10.792 MJ**. Esse resultado está relacionado ao alto nível de mecanização, uma vez que a colheita da silagem envolve simultaneamente o corte, a trituração e o carregamento do material, demandando elevada potência dos equipamentos.

De forma semelhante, na etapa de **transporte**, o consumo energético é dominado pelo combustível, com **5.580 MJ**. Esse comportamento é explicado pelo deslocamento contínuo da

biomassa até o local de armazenamento, sendo o consumo diretamente proporcional à distância percorrida, à carga transportada e ao tempo de operação.

Por outro lado, na etapa de **armazenamento**, embora ainda haja predominância da energia direta, observa-se uma elevada participação do combustível (**5.112,00 MJ**), indicando que essa etapa ainda apresenta forte dependência de insumos energéticos associados às operações mecanizadas. Esse resultado evidencia que o combustível permanece como um dos principais componentes da composição energética, mantendo sua relevância em relação a outras variáveis, como mão de obra e operações auxiliares.

De forma geral, os resultados evidenciam que o consumo energético do sistema produtivo é fortemente influenciado por duas variáveis principais: o **tempo de operação das máquinas**, que impacta diretamente o consumo de combustível, e a **quantidade de fertilizantes aplicada**, especialmente aqueles à base de nitrogênio.

Sob a perspectiva matemática, essas variáveis podem ser interpretadas como os principais parâmetros do modelo energético, sendo responsáveis pelas maiores variações no consumo total. Em particular, o nitrogênio se destaca como a variável de maior impacto, devido ao seu elevado coeficiente energético, caracterizando-se como o principal fator de sensibilidade do sistema.

Portanto, a análise global demonstra que a redução do consumo energético do sistema produtivo depende diretamente da otimização dessas duas variáveis, seja por meio da melhoria da eficiência operacional das máquinas ou pela racionalização do uso de fertilizantes nitrogenados.

7.3 Energia de Saída

A energia de saída do sistema produtivo foi estimada com base na produção total de silagem obtida na área estudada, considerando o teor médio de matéria seca e o coeficiente energético da biomassa, conforme a metodologia descrita na Equação (9).

A produção total registrada foi de **196 toneladas de massa verde**. Considerando um teor médio de matéria seca de **35%**, a massa de matéria seca foi determinada por:

$$M_{MS} = 196.000 \times 0,35 = 68.600 \text{ kg.} \quad (7.12)$$

A energia contida na biomassa ensilada foi então estimada a partir do coeficiente energético de **17,32 MJ kg⁻¹** em base de matéria seca, resultando em:

$$E_{\text{silagem}} = 68.600 \times 17,32 = 1.188.952 \text{ MJ.} \quad (7.13)$$

Alternativamente, utilizando o coeficiente energético em base de matéria natural (**6,06 MJ kg⁻¹**), obtém-se:

$$E_{\text{silagem}} = 196.000 \times 6,06 = 1.187.760 \text{ MJ.} \quad (7.14)$$

A pequena diferença entre os valores (inferior a 0,1%) decorre de arredondamentos nos coeficientes adotados, não comprometendo a consistência da estimativa energética.

Do ponto de vista matemático, observa-se que a energia de saída do sistema pode ser modelada como uma função linear da massa de matéria seca:

$$E_{\text{silagem}} = \alpha \cdot M_{\text{MS}}, \quad (7.15)$$

em que α representa o coeficiente energético da biomassa. Essa relação evidencia que variações na produtividade da cultura impactam diretamente, e de forma proporcional, a energia total produzida.

Os resultados indicam que a energia de saída do sistema produtivo é significativamente superior à energia de entrada, o que, à primeira vista, pode sugerir um elevado ganho energético. No entanto, essa diferença deve ser interpretada à luz dos princípios biofísicos da produção agrícola.

Mesmo considerando perdas operacionais estimadas em aproximadamente **2%** durante as etapas de colheita, transporte e armazenamento, o sistema mantém elevada capacidade de geração de energia. Essas perdas, embora inevitáveis, apresentam impacto relativamente pequeno quando comparadas ao volume total de energia produzida.

Portanto, a elevada energia de saída observada não representa uma violação de princípios energéticos, mas sim a incorporação de energia solar ao sistema produtivo. Esse aspecto é fundamental para a análise da eficiência energética, uma vez que evidencia que o desempenho do sistema não depende apenas das entradas energéticas antrópicas, mas também da capacidade da cultura em converter energia natural em biomassa útil.

7.4 Eficiência Energética

A eficiência energética do sistema produtivo foi determinada pela razão entre a energia de saída, representada pela energia contida na biomassa ensilada, e a energia total de entrada, conforme a Equação (10).

Considerando os valores obtidos nas seções anteriores, tem-se:

$$\eta = \frac{1.188.952}{110.809,84} = 10,73. \quad (7.16)$$

O resultado indica que, para cada unidade de energia não renovável consumida no sistema produtivo, são geradas aproximadamente **10,73 unidades de energia** na forma de biomassa ensilada.

De acordo com a classificação apresentada na metodologia, valores de $\eta > 1$ caracterizam sistemas energeticamente eficientes. Nesse contexto, o sistema analisado apresenta **alta eficiência energética**, evidenciando elevada capacidade de conversão de energia.

Esse comportamento é típico de sistemas agrícolas baseados em culturas fotossintéticas, nos quais a principal fonte de energia é a radiação solar, considerada gratuita e abundante. Assim, mesmo com o uso de insumos e combustíveis de origem fóssil, a energia incorporada na biomassa tende a superar significativamente a energia consumida no processo produtivo.

Entretanto, embora o sistema apresente elevada eficiência energética global, esse resultado não implica necessariamente baixo impacto ambiental. Isso ocorre porque grande parte da energia de entrada está associada a fontes não renováveis, especialmente fertilizantes nitrogenados, que apresentam alto custo energético e impacto ambiental relevante.

Dessa forma, a análise da eficiência energética deve ser interpretada em conjunto com a distribuição das entradas energéticas no sistema. Conforme observado na seção anterior, as etapas de adubação concentram a maior parte do consumo energético, indicando que a eficiência global do sistema é sustentada por um elevado uso de insumos externos.

Sob a perspectiva do problema de pesquisa, o elevado valor de η confirma que o sistema é eficiente do ponto de vista energético, porém evidencia a necessidade de intervenções direcionadas à redução da dependência de fontes não renováveis. Nesse sentido, estratégias como o uso de biofertilizantes ou adoção de fontes renováveis de energia podem contribuir para aumentar a sustentabilidade do sistema sem comprometer sua produtividade.

Portanto, conclui-se que o sistema produtivo de milho para silagem analisado apresenta elevado desempenho energético, sendo capaz de gerar uma quantidade significativa de energia em relação ao consumo realizado, embora ainda dependa fortemente de insumos de alta intensidade energética.

7.5 Intensidade Energética por Etapa

A intensidade energética por etapa foi determinada com base na relação entre a energia consumida em cada fase do sistema produtivo e a energia total de entrada, conforme a Equação (11). Esse indicador permite avaliar a participação relativa de cada etapa no consumo energético global, sendo fundamental para a identificação de gargalos energéticos no sistema.

A distribuição da intensidade energética por etapa é apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 – Intensidade energética por etapa do sistema produtivo

Etapa	Energia (MJ)	Intensidade (%)
Preparo do solo	1.749,07	1,58
Semeadura e adubação	25.200,00	22,75
Tratos culturais	58.900,00	53,14
Colheita	12.100,00	10,93
Transporte	6.760,00	6,10
Armazenamento	6.100,77	5,49
Total	110.809,84	100,00

A análise da Tabela 10 permite identificar claramente que a etapa de **tratos culturais** apresenta a maior intensidade energética do sistema, com **53,14%** do consumo total. Esse resultado evidencia que mais da metade da energia utilizada no processo produtivo está concentrada nessa fase, caracterizando-a como o principal gargalo energético do sistema.

Esse comportamento está diretamente relacionado à aplicação de fertilizantes na adubação de cobertura, especialmente aqueles com elevado teor de nitrogênio, cujo processo de

produção industrial demanda grandes quantidades de energia. Dessa forma, mesmo na ausência de operações mecanizadas, essa etapa apresenta elevado consumo energético devido à energia incorporada aos insumos.

A etapa de **semeadura e adubação de base**, com **22,75%**, também apresenta alta intensidade energética, reforçando o impacto significativo dos fertilizantes no balanço energético do sistema produtivo. Em conjunto, as etapas relacionadas à adubação (base e cobertura) representam aproximadamente **75,89%** da energia total de entrada, evidenciando a forte dependência do sistema em relação a insumos químicos.

As etapas mecanizadas, como **colheita (10,93%)**, **transporte (6,10%)** e **armazenamento (5,49%)**, apresentam intensidades energéticas intermediárias. Nessas fases, o consumo energético está predominantemente associado ao uso de diesel, caracterizando energia direta de origem fóssil.

A etapa de **preparo do solo** apresentou a menor intensidade energética (**1,58%**), indicando baixa contribuição relativa para o consumo total, apesar do uso de máquinas agrícolas.

Sob a ótica do problema de pesquisa, os resultados obtidos permitem identificar de forma clara que a etapa de **tratos culturais** é a mais intensiva energeticamente, sendo, portanto, a principal candidata à implementação de alternativas de energia renovável ou estratégias de redução do consumo energético.

Nesse sentido, intervenções voltadas à substituição parcial de fertilizantes sintéticos por fontes alternativas, como biofertilizantes ou sistemas integrados de produção, podem contribuir significativamente para a redução da dependência de energia não renovável. Além disso, práticas de manejo mais eficientes podem otimizar o uso de insumos, reduzindo o consumo energético sem comprometer a produtividade.

Portanto, a análise da intensidade energética por etapa constitui uma ferramenta essencial para o diagnóstico do sistema produtivo, permitindo identificar pontos críticos e subsidiar decisões voltadas à melhoria da eficiência energética e da sustentabilidade do processo de produção de silagem de milho.

7.6 Análise Matemática Integrada do Sistema Energético

A análise matemática do sistema energético permite interpretar os resultados obtidos para além de uma descrição numérica dos indicadores, tratando o sistema produtivo como um modelo quantitativo composto por variáveis interdependentes. Sob essa perspectiva, cada etapa do processo agrícola contribui para a energia total de entrada, de modo que o comportamento global do sistema pode ser descrito por relações funcionais entre suas grandezas energéticas.

Inicialmente, a energia total de entrada do sistema pode ser representada como a soma das energias consumidas em cada etapa operacional:

$$E_{entrada} = E_p + E_s + E_{tc} + E_c + E_t + E_a \quad (7.17)$$

em que cada termo representa, respectivamente, as energias associadas ao preparo do solo,

semeadura e adubação, tratos culturais, colheita, transporte e armazenamento.

Essa formulação caracteriza uma função linear multivariável, na qual a energia total é obtida por meio da soma direta das contribuições individuais de cada etapa. Do ponto de vista matemático, essa estrutura implica que não há termos de interação ou não linearidade entre as variáveis, o que permite uma análise direta da influência de cada componente sobre o total.

7.6.1 Análise de sensibilidade por derivadas parciais

Para avaliar a influência de cada variável sobre a energia total do sistema, utiliza-se o conceito de derivada parcial. A derivada parcial de uma função em relação a uma de suas variáveis mede a taxa de variação da função quando apenas essa variável é alterada, mantendo as demais constantes.

No caso da energia associada aos tratos culturais, tem-se:

$$\frac{\partial E_{entrada}}{\partial E_{tc}} = 1. \quad (7.18)$$

Esse resultado decorre diretamente da estrutura linear da função, na qual E_{tc} aparece como um termo de primeira ordem, sem coeficientes adicionais.

O valor unitário da derivada parcial indica que a relação entre E_{tc} e E_T é direta e proporcional. Em termos práticos, isso significa que qualquer variação na energia consumida nos tratos culturais é integralmente transferida para a energia total do sistema. Assim, um aumento de 1 MJ em E_{tc} implica um aumento de 1 MJ em E_T , e uma redução de mesma magnitude produz efeito equivalente no sentido oposto.

Essa propriedade evidencia que o modelo não apresenta mecanismos de compensação interna para essa variável, ou seja, seu impacto não é atenuado nem amplificado por outras componentes do sistema.

7.6.2 Eficiência energética do sistema

A eficiência energética é definida como a razão entre a energia de saída e a energia de entrada:

$$\eta = \frac{E_{saida}}{E_{entrada}}. \quad (7.19)$$

Substituindo-se os valores obtidos experimentalmente, tem-se:

$$\eta = 10,72. \quad (7.20)$$

Esse resultado indica que, para cada unidade de energia consumida no sistema, são produzidas aproximadamente 10,72 unidades de energia na forma de biomassa. Ressalta-se que essa amplificação não representa criação de energia, mas sim a incorporação da energia solar ao sistema por meio da fotossíntese.

7.6.3 Modelagem da energia de saída

A energia de saída também pode ser modelada em função da massa de matéria seca produzida:

$$E_{saida} = \alpha \cdot M_{MS}, \quad (7.21)$$

em que α representa o coeficiente energético da biomassa e M_{MS} corresponde à massa de matéria seca. Essa relação linear indica proporcionalidade direta entre a produção agrícola e a energia gerada.

7.6.4 Análise da eficiência via cálculo diferencial

Considerando a eficiência energética como função da energia de entrada, tem-se:

$$\eta(E_{entrada}) = \frac{E_{saida}}{E_{entrada}}. \quad (7.22)$$

Derivando-se essa função em relação a $E_{entrada}$, assumindo E_{saida} constante, obtém-se:

$$\frac{d\eta}{dE_{entrada}} = -\frac{E_{saida}}{E_{entrada}^2}. \quad (7.23)$$

Como $E_{saida} > 0$ e $E_{entrada} > 0$, conclui-se que:

$$\frac{d\eta}{dE_{entrada}} < 0. \quad (7.24)$$

O sinal negativo da derivada indica que a eficiência energética é uma função decrescente da energia de entrada. Em termos práticos, isso significa que o aumento do consumo energético, sem o correspondente aumento na produção, resulta na redução da eficiência do sistema.

Essa propriedade revela um comportamento de retornos decrescentes, no qual a adição de insumos energéticos não implica necessariamente melhoria no desempenho global, podendo, inclusive, comprometer a eficiência energética.

7.6.5 Interpretação sob a ótica da otimização

Sob a perspectiva da otimização, o problema pode ser interpretado como a minimização da energia total de entrada $E_{entrada}$, com o objetivo de maximizar a eficiência energética η ou a energia líquida do sistema.

A análise da derivada $\frac{d\eta}{dE_{entrada}} < 0$ demonstra que a eficiência é uma função decrescente da energia de entrada, de modo que sua maximização ocorre quando $E_{entrada}$ é minimizada.

Além disso, a derivada parcial $\frac{\partial E_{entrada}}{\partial E_{lc}} = 1$ evidencia que reduções na energia consumida na etapa de tratamentos culturais produzem impacto direto e proporcional na energia total, reforçando o papel dessa variável como principal alvo em estratégias de otimização.

7.6.6 Considerações finais

A análise matemática integrada permite identificar três características fundamentais do sistema:

- elevada eficiência energética global;
- forte sensibilidade à etapa de tratos culturais;
- redução da eficiência quando há aumento da energia de entrada sem ganho proporcional de produção.

Sob a ótica da otimização, esses resultados indicam que intervenções direcionadas à redução do consumo energético na etapa dominante tendem a produzir os maiores ganhos no desempenho energético global do sistema.

7.7 Avaliação do Ciclo de Vida

A análise da contribuição dos insumos para as categorias de impacto ambiental permitiu identificar os principais pontos críticos do sistema produtivo de milho para silagem, conforme apresentado na imagem 8.

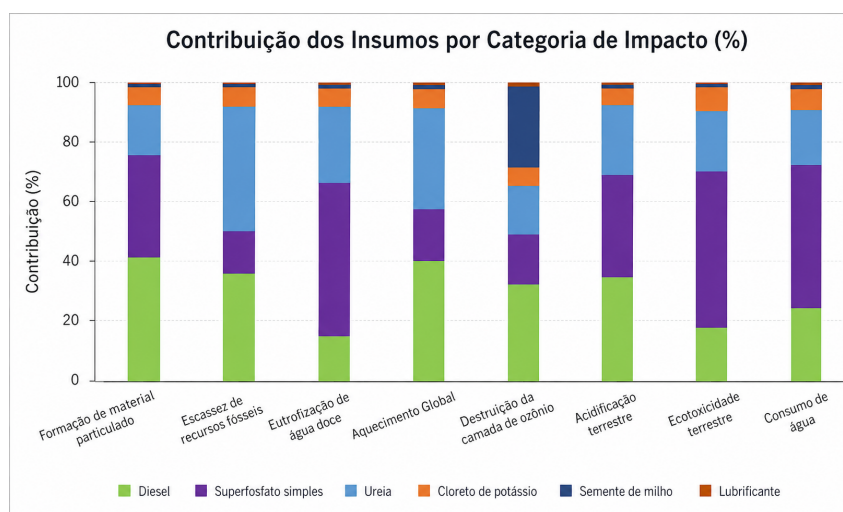


Figura 8 – Avaliação do Ciclo de Vida para a produção de silagem

Observa-se que os impactos não estão distribuídos de forma homogênea entre os insumos avaliados, concentrando-se principalmente nos fertilizantes minerais e no combustível utilizado nas operações mecanizadas. Esse comportamento demonstra que os impactos ambientais do sistema são fortemente influenciados tanto pelos processos industriais de fabricação dos insumos quanto pelas emissões geradas durante a fase agrícola.

Os resultados indicam que a utilização de fertilizantes representa uma das etapas mais relevantes do ponto de vista ambiental. A elevada contribuição da ureia e do superfosfato simples nas categorias de impacto avaliadas está associada à elevada demanda energética envolvida

em sua fabricação, bem como às emissões decorrentes de sua aplicação no campo. Esse comportamento está de acordo com estudos realizados por Fantin et al. (2016) e Hanafiah et al. (2022), que identificaram os fertilizantes minerais como um dos principais responsáveis pelos impactos ambientais em sistemas de produção de milho, especialmente nas categorias relacionadas às mudanças climáticas, acidificação e eutrofização. Segundo os autores, a magnitude desses impactos está diretamente relacionada à quantidade de nutrientes aplicada, à eficiência de aproveitamento pelas culturas e aos processos industriais envolvidos na produção dos fertilizantes sintéticos.

De forma geral, os resultados evidenciam que estratégias voltadas para o aumento da eficiência do uso de fertilizantes, o manejo racional da adubação, a utilização de insumos de menor impacto ambiental, como biofertilizantes e fertilizantes de origem orgânica, e a otimização das operações mecanizadas possuem elevado potencial para reduzir os impactos ambientais associados à produção de milho.

A adoção de práticas que promovam o melhor aproveitamento dos nutrientes pelas culturas pode contribuir para a redução da dependência de fertilizantes minerais sintéticos, especialmente aqueles associados a elevados gastos energéticos em sua produção (Alisson, 2022). Além disso, a utilização de fontes alternativas de nutrientes, quando tecnicamente viável, pode favorecer a redução do consumo energético, da utilização de recursos não renováveis e das emissões associadas ao sistema produtivo, promovendo maior sustentabilidade ambiental da atividade agrícola.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho permitiu modelar e analisar o consumo energético não renovável da produção de milho para silagem em uma Propriedade A, localizada em um município do estado de Minas Gerais. Os resultados evidenciaram que o sistema apresenta elevada dependência de energia direta, responsável por 96,89% da energia de entrada, sendo a etapa de tratos culturais a principal responsável pelo consumo energético total. A análise também identificou os fertilizantes nitrogenados como os insumos de maior impacto energético, destacando sua influência sobre o comportamento global do sistema e evidenciando sua relevância na dinâmica energética da produção.

Apesar da elevada demanda energética observada em determinadas etapas do processo produtivo, o sistema apresentou eficiência energética de 10,73, indicando elevada capacidade de conversão de energia na produção de biomassa para silagem. A modelagem matemática mostrou-se adequada para representar o sistema analisado e identificar os fatores de maior influência sobre o consumo energético, especialmente os fertilizantes nitrogenados. Dessa forma, conclui-se que a produção estudada apresenta elevado desempenho energético, embora permaneça fortemente dependente de fontes não renováveis.

Diante dos resultados obtidos, verifica-se que a redução do consumo energético associado aos fertilizantes nitrogenados constitui uma das principais oportunidades para o aumento da sustentabilidade do sistema produtivo. Nesse sentido, a adoção de práticas como o uso racional de fertilizantes, o manejo baseado em análises de solo, a utilização de biofertilizantes e a incorporação de fontes renováveis de energia pode contribuir para a diminuição da dependência de insumos de alta intensidade energética, favorecendo a manutenção da eficiência produtiva com menor impacto sobre os recursos não renováveis.

REFERÊNCIAS

- ALISSON, E. *Manejo e novos insumos ajudam a reduzir o uso de fertilizantes minerais na agricultura brasileira*. 2022. Acesso em: 6 jul. 2026. Disponível em: <<https://ods.fapesp.br/manejo-e-novos-insumos-ajudam-a-reduzir-o-uso-de-fertilizantes-minerais-na-agricultura-brasileira/7748>>.
- ANGONESE, A. R. et al. Eficiência energética de sistema de produção de suínos com tratamento dos resíduos em biodigestor. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 10, n. 3, p. 745–750, 2006.
- BALASTREIRE, L. A. *Máquinas agrícolas*. São Paulo: Manole, 1990.
- BARBOSA, J. C. Integrando modelagem matemática nas práticas pedagógicas. *Educação Matemática em Revista*, São Paulo, v. 14, n. 26, p. 17–25, 2009.
- BASSANEZI, R. C. *Ensino-aprendizagem com modelagem matemática*. 2002. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/256007243_Ensino_-_aprendizagem_com_Modelagem_matematica>.
- BASSANEZI, R. C. *Ensino-aprendizagem com modelagem matemática: uma nova estratégia*. 3. ed. São Paulo: Contexto, 2006.
- BATISTA, P. H. S. et al. *Boas práticas na produção de silagem para bovinos*. 2024. Disponível em: <<https://anais.uel.br/portal/index.php/segiq/article/view/4388>>.
- Brasil. Empresa de Pesquisa Energética. *Balanço Energético Nacional 2024*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2024. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-723/BEN2024.pdf>>.
- BURAK, D. *Modelagem matemática: ações e interações no processo de ensino-aprendizagem*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1992.
- CAMIOTO, F. de C. *Consumo energético nos setores industriais brasileiros: uma avaliação de desempenho e estratégias para a redução da emissão de CO₂*. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.
- CAMPOS, A. T.; CAMPOS, A. T. de. Balanços energéticos agropecuários: uma importante ferramenta como indicativo de sustentabilidade de agroecossistemas. *Ciência Rural*, v. 34, n. 6, p. 1977–1985, 2004.
- CARDOSO, V. M. et al. *Geopolítica Global dos Fertilizantes: Impactos sobre o Agronegócio Brasileiro*. São Paulo, 2025.
- CARVALHO, D. F. et al. Demanda energética de diferentes operações agrícolas mecanizadas na cultura do milho. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 42, n. 2, p. 291–297, 2012.
- CRIPPA, J. *Otimização da avaliação da sustentabilidade do ciclo de vida (ASCV) integrada à modelagem da informação da construção (BIM): proposta de método para tomada de decisão em estudos preliminares de infraestrutura viária urbana*. Tese (Doutorado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2024.

- DANTAS, V. B. et al. Balanço energético dos sistemas de produção de soja e milho safrinha em uma pequena propriedade no oeste do paraná. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*. João Pessoa: SBEA/UFCG, 2006.
- EMATER-MG. *Cultura do Milho*. 2016. Disponível em: <<https://www.emater.mg.gov.br/download.do?id=17022>>.
- Energia Move o Mundo. *Agricultura energética: como integrar produção de alimentos e energia renovável para um futuro sustentável*. Disponível em: <<https://energiamoveomundo.com.br/>>.
- FANTIN, V. et al. Environmental life cycle assessment of grain maize production: An analysis of factors causing variability. *Science of the Total Environment*, v. 553, p. 551–564, 2016.
- FEI, C. J.; MCCARL, B. A. The role and use of mathematical programming in agricultural, natural resource, and climate change analysis. *Annual Review of Resource Economics*, v. 15, p. 123–145, 2023.
- FIORIN, J. E. et al. Consumo energético e lubrificantes em operações mecanizadas agrícolas. *Ciência Rural*, Santa Maria. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/cr/a/5xcyHgPk3ZdZ7tb8KNPSFXQ/?lang=pt>>.
- GUARESCHI, R. F. et al. Eficiência energética na cultura do milho cultivado em diferentes regiões brasileiras. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v. 42, n. 4, p. 2271–2292, 2021.
- HANAFIAH, M. M. et al. Life cycle assessment of maize production systems and environmental hotspots. *Applied Sciences*, v. 12, n. 22, p. 11779, 2022.
- HARTMANN, A. L. B.; MALTEMPI, M. V.; DOMINGOS, A. M. D. *A modelagem matemática como potencial   sustentabilidade: indicativas de educadores matemáticos portugueses*. 2024.
- HAUSCHILD, M. Z.; ROSENBAUM, R. K.; OLSEN, S. I. *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Cham: Springer International Publishing, 2018.
- HYMA. *Densidade da Graxa*. 2025. Acesso em: 6 jul. 2026. Disponível em: <<https://www.hymalube.com/pt/densidade-da-graxa/>>.
- Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA). *Análise das emissões de gases de efeito estufa em 2023 e suas implicações para as metas climáticas do Brasil*. 2024. Disponível em: <<https://energiaeambiente.org.br/produto/emissoesdegasesdeefeitoestufaem2023>>.
- Marchesan. *GAICR – Grade Aradora Intermediária Controle Remoto*. Disponível em: <<https://www.marchesan.com.br/produto/detalhe/GAICR%E2%80%9393Grade-Aradora-Intermediaria-Controle-Remoto/pt-BR>>.
- MARTINS, F. G. L. et al. Análise energética da produção de milho para silagem cultivado em diferentes espaçamentos. *Energia na Agricultura*, Botucatu, v. 30, n. 4, p. 418–428, 2015.
- Massey Ferguson. *MF 275 Advanced: ficha técnica*. Disponível em: <<https://www.popagro.com.br/catalogo/maquinas-agricolas/tratores/massey-ferguson/mf-275-advanced#ficha-tecnica>>.
- Megawhip. *Tempo de validade de máquinas agrícolas e implementos na agroindústria*. Disponível em: <<https://megawhip.com.br/tempo-de-validade-de-maquinas-agricolas-e-implementos-na-agroindustria/>>.

- MELO, D. de et al. Balanço energético do sistema de produção de soja e milho em uma propriedade agrícola do oeste do paraná. *Acta Scientiarum. Agronomy*, Maringá, v. 29, n. 2, p. 173–178, 2007.
- MOHAMMADI, A. et al. Use of life cycle assessment and modeling techniques for prediction of energy-environmental indicators in different wheat production systems. *Ecological Indicators*, v. 156, 2023.
- NOGUEIRA, P. *Transformar a Agricultura com Eficiência Energética*. 2023. Disponível em: <<https://ajap.pt/transformar-a-agricultura-com-eficiencia-energetica/>>.
- PEREIRA, C. N.; CASTRO, C. N. de. *Expansão da produção agrícola, novas tecnologias de produção, aumento de produtividade e o desnível tecnológico no meio rural*. Rio de Janeiro, 2022. (Texto para Discussão, 2765).
- Redação Agrishow. *Energias renováveis no agronegócio: tipos, benefícios e caminhos para adotar no campo*. 2025. Disponível em: <<https://digital.agrishow.com.br/sustentabilidade/energias-renovaveis-no-agronegocio-caminhos/>>.
- RIQUETTI, N. B.; BENEZ, S. H.; SILVA, P. R. A. Demanda energética em diferentes manejos de solo e híbridos de milho. *Energia na Agricultura*, Botucatu, v. 27, n. 2, p. 76–85, 2012.
- ROMANELLI, T. L.; MILAN, M. Energy balance methodology and modeling of supplementary forage production for cattle in brazil. *Scientia Agricola*, v. 62, n. 1, p. 1–7, 2005.
- SCHNEIDER, E. M.; FUJII, R. A. X.; CORAZZA, M. J. Pesquisas quali-quantitativas: contribuições para a pesquisa em ensino de ciências. *Revista Pesquisa Qualitativa*, v. 5, n. 9, p. 569–584, 2017. Disponível em: <<https://editora.sepq.org.br/rpq/article/view/157>>.
- SILBER, R. M. *Avaliação energética em diferentes sistemas de produção de soja e milho*. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas)) — Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2021. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11152/tde-13122021-113536/publico/Rodolfo_Michelassi_Silber_versao_revisada.pdf>.
- Syngenta. *História do milho no Brasil: origem e evolução da produção*. Disponível em: <<https://maisagro.syngenta.com.br/tudo-sobre-agro/historia-do-milho-no-brasil-origem-e-evolucao-da-producao/>>.
- UNICENTRO. *Ambiência*. Disponível em: <<https://revistas.unicentro.br/index.php/ambiencia/article/view/506/668>>.

APÊNDICE A: QUESTIONÁRIO TÉCNICO

Identificação

1. Nome do produtor: Produtor A
2. Propriedade: Propriedade A
3. Município/UF: Cidade A
4. Área plantada (ha): 5 ha
5. Safra (ano): 2025 - 2026
6. Ciclo da cultura: Anual

Preparo do solo

1. Tipo de preparo:
 - (x) Convencional - Sistema de preparo do solo que envolve revolvimento intenso, normalmente com aração e gradagem, promovendo desestruturação da camada superficial e incorporação de resíduos vegetais.
 - () Plantio direto - Sistema de manejo em que não há revolvimento do solo, matendo-se a palhada da cultura anterior na superfície, com semeadura realizada diretamente sobre o resíduo vegetal.
 - () Mínimo - Sistema intermediário, com redução do número e da intensidade das operações de preparo do solo, promovendo menor mobilização em comparação ao sistema convencional.
2. Caso o preparo do solo seja mecanizada, registrar na tabela abaixo os dados operacionais referentes ao implemento utilizado na operação.

Tabela 11 – Dados operacionais utilizados no preparo do solo

Implemento	Potência (kW)	Dias	Horas/dia	Diesel (L/hora)
Trator Massey Ferguson 275	55,1624	1	5	8
Grade Aradora Tatu Marchesan 16 discos	—	—	—	—

3. Há utilização de energia elétrica na etapa avaliada? () Sim (x) Não
4. Em caso afirmativo, informar o consumo total de energia elétrica (kWh): -
5. Número de trabalhadores necessários para a execução da etapa: 1 trabalhador

Semeadura e adubação

1. A semeadura foi realizada de forma:

() Manual

(x) Mecanizada

2. Caso a semeadura seja mecanizada, registrar na tabela abaixo os dados operacionais referentes ao implemento utilizado na operação.

Tabela 12 – Dados operacionais utilizados na semeadura e adubação

Implemento	Potência (kW)	Dias	Horas/dia	Diesel (L/hora)
Trator Massey Ferguson 275	55,1624	1	7	8
Plantadeira Tatu Marchesan 3 linhas	–	–	–	–

3. Há utilização de energia elétrica na etapa avaliada? () Sim (x) Não

4. Em caso afirmativo, informar o consumo total de energia elétrica (kWh): -

5. Quantidade de sementes utilizadas:

- Cultivar: Milho Híbrido Agrisure Viptera 3 - KWS 9606
- Quantidade total utilizada (kg): 100 kg
- Quantidade por hectare (kg/ha): 20 kg/ha

6. Fertilizantes aplicados na semeadura (adubação de base):

Tabela 13 – Fertilizantes aplicados na semeadura

Tipo de fertilizante	Formulação	Quantidade total (kg)	Dose (kg/ha)
Fertipar NPK	08-28-16	2000	400

7. Número de trabalhadores necessários para a execução da etapa: 1 trabalhador

Tratos culturais

1. Práticas utilizadas:

- () Irrigação - Fornecimento controlado de água via sistemas mecanizados.
- () Capina manual - Controle de plantas daninhas com ferramentas manuais.
- () Capina mecanizada - Controle de plantas daninhas com trator e implementos.
- () Pulverização - Aplicação de defensivos agrícolas.
- (x) Adubação de cobertura - Aplicação de fertilizantes após a emergência.

2. Há utilização de energia elétrica na etapa avaliada? () Sim (x) Não

3. Em caso afirmativo, informar o consumo total de energia elétrica (kWh): -

4. Fertilizantes aplicados em cobertura:

Tabela 14 – Fertilizantes aplicados em cobertura

Tipo de fertilizante	Formulação	Quantidade total (kg)	Dose (kg/ha)
Fertipar NPK	30-00-20	2500	500

A adubação de cobertura foi executada manualmente, não havendo utilização de máquinas nem consumo de energia direta, sendo considerada, na modelagem energética, apenas a energia incorporada ao insumo fertilizante. Além disso, estima-se que o trabalhador tenha despendido aproximadamente 17 horas para a realização da atividade.

5. Caso a operação seja realizada de forma mecanizada, registrar na tabela abaixo os dados operacionais do conjunto mecanizado utilizado.

Tabela 15 – Dados operacionais utilizados nos tratos culturais

Implemento	Potência	Dias	Horas/dia	Gasolina no gerador (L/h)
—	—	—	—	—

Observação: Nesta etapa, não houve utilização de implementos agrícolas mecanizados.

6. Caso seja utilizado drone para pulverizar, qual produto foi aplicado?

Tabela 16 – Defensivos agrícolas utilizados

Produto comercial	Finalidade	Ingredientes	Quantidade total (L ou kg)	Dose (L ou kg/ha)
—	—	—	—	—
—	—	—	—	—

Observação: Nesta etapa, não foi realizada aplicação de defensivos agrícolas.

7. Caso utilize irrigação, informar:

- Tipo de sistema (aspersão, pivô central, gotejamento, outro): -
- Número de irrigações realizadas: -
- Lâmina média aplicada (mm): -
- Potência da bomba (cv ou kW): -
- Tempo médio de funcionamento por irrigação (h): -

8. Número de trabalhadores necessários para a execução da etapa: 1 trabalhador

Colheita e processamento para silagem

1. Tipo de colheita realizada:

☒ (x) Mecanizada☐ () Manual

2. Sistema de colheita:

☒ (x) Planta inteira☐ () Apenas espigas

3. Tipo de máquina utilizada:

☒ (x) Ensiladeira tratorizada - A ensiladeira tratorizada é um implemento que não possui motor próprio, sendo acionada pela tomada de potência do trator, que também fornece a tração do conjunto. Assim, o consumo de combustível está relacionado ao trator. É mais comum em propriedades pequenas e médias e apresenta capacidade operacional moderada.

☐ () Ensiladeira autopropelida - A ensiladeira autopropelida possui motor próprio e não depende de trator para operar. Reúne corte, processamento e deslocamento em uma única máquina, oferecendo maior potência e maior rendimento operacional, sendo mais utilizada em áreas extensas. Nesse caso, o consumo de combustível é da própria máquina.

4. Caso a operação seja realizada de forma mecanizada, registrar na tabela abaixo os dados operacionais do conjunto mecanizado utilizado.

Tabela 17 – Dados operacionais utilizados na colheita e no processamento para silagem

Implemento	Potência (kW)	Dias	Horas/dia	Diesel (L/hora)
Trator Massey Ferguson 275	55,1624	4	9,5	8
Ensiladeira Tratorizada JF 90	—	—	—	—

Ensiladeira Tratorizada JF 90

5. Há utilização de energia elétrica na etapa avaliada? ☐ () Sim ☒ (x) Não

6. Em caso afirmativo, informar o consumo total de energia elétrica (kWh): -

7. Número de trabalhadores necessários para a execução da etapa: 1 trabalhador

Transporte da silagem

1. Distância média da área de colheita até o local de armazenamento (km): 1 km
2. Condição predominante do trajeto:
 - (x) Estrada de terra
 - () Estrada cascalhada
 - () Asfalto
 - () Misto
3. Tipo de veículo utilizado:
 - (x) Trator + carreta agrícola
 - () Caminhão
 - () Outro:
4. Capacidade de carga do veículo (t ou m³): 5 t
5. Número médio de viagens por dia: 20 viagens
6. Número de dias para a realização da etapa: 2 dias
7. Tempo médio por viagem (ida e volta) (h): 30 min
8. Caso o transporte seja realizado de forma mecanizada, registrar na tabela abaixo os dados operacionais do veículo ou conjunto mecanizado utilizado.

Tabela 18 – Dados operacionais utilizados no transporte da silagem

Veículo/ Conjunto	Potência (kW)	Capacidade (t)	Dias	Horas/ dia	Diesel (L/hora)
Trator Massey Ferguson 275	55,1624	5	2	10	8
Carreta de 5 toneladas	—	—	—	—	—

9. Há utilização de energia elétrica na etapa avaliada? () Sim (x) Não
10. Em caso afirmativo, informar o consumo total de energia elétrica (kWh): -
11. Número de trabalhadores necessários para a execução da etapa: 1 trabalhador

Armazenamento (compactação e vedação)

1. Tipo de silo utilizado:
 - ☐ Silo trincheira
 - ☒ Silo de superfície
 - ☐ Silo bolsa
 - ☐ Outro:
2. Volume ou capacidade do silo (m^3 ou t): 200 t
3. A compactação foi realizada de forma:
 - ☐ Manual
 - ☒ Mecanizada
4. Caso a compactação seja mecanizada, informar o tipo de máquina utilizada: Trator Massey Ferguson 275
5. Tempo médio diário destinado à compactação (h/dia): 6 h/dia
6. Material utilizado para vedação:
 - ☒ Lona plástica ☐ Dupla lona ☐ Outro:
7. Quantidade de lona utilizada (m^2): 1000 m^2
8. Utilização de inoculante?
 - ☐ Sim
 - ☒ Não
9. Produção total ensilada (t de massa verde): 196 t
10. Há utilização de energia elétrica nesta etapa? ☐ Sim ☒ Não
11. Em caso afirmativo, informar o consumo total de energia elétrica (kWh): -
12. Caso haja uso de máquinas na compactação, registrar na tabela abaixo os dados operacionais do conjunto mecanizado utilizado.

Tabela 19 – Dados operacionais utilizados na compactação e armazenamento da silagem

Máquina/Implemento	Potência (kW)	Dias	Horas/dia	Diesel (L/hora)
Trator Massey Ferguson 275	55,1624	3	6	8
Carreta agrícola de 5 toneladas	—	—	—	—

13. Caso utilize inoculante, informar:

- Produto comercial: -
- Quantidade utilizada (kg ou L): -
- Dose por tonelada de massa verde: -

14. Número de trabalhadores necessários para a execução da etapa: 1 trabalhador

Observações gerais e informações complementares

1. Produção total obtida na área avaliada (t de silagem): 196 t
2. Destino principal da silagem produzida:
 - ☐ Alimentação do rebanho na própria propriedade
 - ☒ Comercialização
 - ☐ Ambos
3. Houve perdas significativas durante colheita, transporte ou armazenamento?
 - ☒ Sim
 - ☐ Não
4. Caso afirmativo, estimar a perda (%): 2 %
5. A propriedade utiliza alguma fonte de energia renovável?
 - ☒ Não
 - ☐ Energia solar
 - ☐ Biomassa
 - ☐ Outra:
6. Existe controle ou registro do consumo anual de combustível agrícola?
 - ☐ Sim
 - ☒ Não

Observação: O consumo de 8 L/h nas etapas da produção agrícola em que houve utilização de combustível corresponde a um valor estimado pelo proprietário.
7. A mecanização é considerada adequada para a área cultivada?
 - ☒ Sim
 - ☐ Não
 - ☐ Parcialmente