

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**AS REGULAGENS DA COLHEDORA PODEM AFETAR A
QUALIDADE DO PROCESSO DA COLHEITA MECANIZADA DO
MILHO?**

GABRIEL AKIO HIRAOKA DALMOLIN

Jaboticabal – SP

2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**AS REGULAGENS DA COLHEDORA PODEM AFETAR A QUALIDADE DO
PROCESSO DA COLHEITA MECANIZADA DO MILHO?**

GABRIEL AKIO HIRAOKA DALMOLIN

Orientador: Prof. Dr. Rouverson Pereira da Silva

Coorientadores: Me. Airton Andrade da Silva;

Me. Thiago Caio Moura Oliveira

Trabalho apresentado à Faculdade de Ciências
Agrárias e Veterinárias – UNESP, Câmpus de
Jaboticabal, para graduação em ENGENHARIA
AGRONÔMICA.

Jaboticabal – SP

2025

D148r

Dalmolin, Gabriel Akio Hiraoka

As regulagens da colhedora podem afetar a qualidade do processo da colheita mecanizada do milho? / Gabriel Akio Hiraoka Dalmolin. -- Jaboticabal, 2025
45 p.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Agrônômica) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e
Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Rouverson Pereira da Silva

Coorientador: Airton Andrade da Silva

1. controle de qualidade. 2. controle de processo métodos estatísticos. 3. milho
colheita. 4. perdas durante a colheita. 5. produtividade agrícola. I. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus Jaboticabal



GABRIEL AKIO HIRAOKA DALMOLIN

**AS REGULAGENS DA COLHEDORA PODEM AFETAR A QUALIDADE DO
PROCESSO DA COLHEITA MECANIZADA DO MILHO?**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrônômica.

Orientador: Prof. Dr. Rouverson Pereira da Silva
Coorientadores: Me. Airton Andrade da Silva;
Me. Thiago Caio Moura Oliveira

Área de Concentração: Máquinas e Mecanização Agrícola

Data da defesa: 19/09/2025

(X) Aprovado
() Reprovado

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Rouverson Pereira da Silva
UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

Eng. Agrônomo Me. Breno dos Santos Silva
UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

Eng. Agrônomo Erika Cristina Gomes Sales
UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

Aprovado em reunião do Conselho do Departamento em:

25/11/2025.

Prof. Dr. Luiz Fabiano Palaretti
Chefe do Departamento

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais Eloir Dalmolin e Neusa Kiyomi Hiraoka Dalmolin, ao meu irmão Gustavo Yoshio Hiraoka Dalmolin por sempre me incentivar e me apoiar em toda minha trajetória até aqui.

Agradecimentos.

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida, pela saúde e pela força concedida em todos os momentos desta caminhada acadêmica.

À minha família, em especial aos meus pais, Eloir Dalmolin e Neusa Kiyomi Hiraoka Dalmolin, e ao meu irmão Gustavo Yoshio Hiraoka Dalmolin, pelo apoio incondicional e por sempre estarem ao meu lado.

Ao meu professor orientador, Prof. Dr. Rouverson Pereira da Silva, pela dedicação e confiança depositada neste trabalho, pelo conhecimento compartilhado e pelas orientações que garantiram meu crescimento acadêmico e profissional.

Aos meus coorientadores, Me. Airton Andrade da Silva e Me. Thiago Caio Moura Oliveira, pelo total apoio e pelos ensinamentos que contribuíram significativamente para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu parceiro de projeto e de graduação, João Gabriel Querido Dias, pela troca de experiências e pelo esforço conjunto que tornaram possível a realização desta pesquisa.

Ao Laboratório de Máquinas e Mecanização Agrícola (LAMMA), pela estrutura, pelo suporte técnico e pelo ambiente de aprendizado que foram cruciais para o andamento deste estudo.

À Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE), pela disponibilidade da área experimental, dos profissionais e das máquinas utilizadas.

Ao PET-AGRO, pela oportunidade de crescimento acadêmico, profissional e pessoal, além das experiências que enriqueceram minha formação.

À República Independência, pelo companheirismo, pelas amizades e pelas memórias construídas ao longo desta jornada.

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da UNESP – Campus de Jaboticabal, pela formação de excelência, pela oportunidade de aprendizado e por ser o espaço que marcou minha trajetória acadêmica.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito obrigado!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	9
RESUMO	10
ABSTRACT	11
1 INTRODUÇÃO.....	12
2 OBJETIVOS.....	14
2.1 Geral.....	14
2.2 Específicos	14
3 REVISÃO DE LITERATURA	15
3.1 Cultura do milho	15
3.2 Sistema de Produção do Milho	16
3.3 Colheita Mecanizada do Milho.....	17
3.4 Perdas na Colheita do Milho.....	20
3.5 Controle Estatístico.....	22
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	23
4.1 Caracterização do Local de Estudo.....	23
4.2 Variáveis de Campo.....	24
4.3 Dados espectrais	26
4.4 Delineamento Experimental e Análise Estatística	26
5 RESULTADOS	28
5.1 Análise descritiva dos dados.....	28
5.2 Variabilidade das variáveis relacionadas à colheita.....	29
5.3 Controle estatístico da colheita aplicado às perdas.....	35
6 DISCUSSÃO.....	37
6.1 Análise descritiva das variáveis	37
6.2 Variabilidade das variáveis relacionadas à colheita.....	38
6.3 Controle estatístico da colheita aplicado às perdas.....	41
7 CONCLUSÃO.....	43
8 REFERÊNCIAS	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de trilha das colhedoras de fluxo tangencial.	18
Figura 2 - Sistema de trilha das colhedoras de fluxo axial.	19
Figura 3- Sistema de trilha das colhedoras híbridas.	19
Figura 4- Mapa de localização da área de estudo.	24
Figura 5- Área amostral da coleta dos pontos.	25
Figura 6 – Carta de controle da variável NDVI.	30
Figura 7 - Carta de controle da altura de inserção da primeira espiga.	31
Figura 8 - Carta de controle da altura de planta.	32
Figura 9 - Carta de controle do diâmetro do colmo.	33
Figura 10 - Carta de controle sobre a umidade.	34
Figura 11 - Carta de controle da produtividade.	35
Figura 12 - Carta de controle das perdas na colheita.	36
Figura 13- Gráfico sobre a variabilidade das variáveis.	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Causas especiais em um processo agrícola e suas explicações	23
Tabela 2 - Índice NDVI	26
Tabela 3 - Análise descritiva dos dados.	29
Tabela 4 - Parâmetros das variáveis analisadas	29

RESUMO

A colheita mecanizada do milho representa uma etapa crítica do processo produtivo, pois perdas excessivas podem comprometer a rentabilidade e a sustentabilidade da lavoura. Teve-se como objetivo determinar regulagens que possibilitem um processo de colheita mais estável e menos variável na cultura do milho, por meio da aplicação de cartas de controle como ferramenta de avaliação da qualidade operacional. O estudo foi conduzido em área experimental da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da UNESP, em Jaboticabal (SP), utilizando o híbrido AG8701 PRO4 nos anos de 2023/2024. Foram avaliadas variáveis morfológicas e fisiológicas da cultura (NDVI, altura de inserção da primeira espiga, altura de planta, diâmetro do colmo, umidade e produtividade), bem como as perdas associadas à colheita, em diferentes combinações de velocidade de deslocamento (4 e 7 km h⁻¹) e rotação do cilindro trilhador (550 e 750 rpm). Nesse contexto, o Controle Estatístico de Processo (CEP) configurou-se como ferramenta capaz de identificar variações, monitorar a qualidade operacional e indicar regulagens mais adequadas para a colhedora. As análises descritivas e as cartas de controle permitiram identificar causas comuns e especiais de variação, destacando diferenças entre as regulagens testadas. Observou-se que a combinação de 7 km h⁻¹ com 550 rpm apresentou maior estabilidade estatística e menores oscilações, sendo a regulagem mais adequada para reduzir perdas e garantir eficiência operacional. Em contrapartida, a associação de 7 km h⁻¹ com 750 rpm resultou em instabilidade acentuada e aumento das perdas. Conclui-se que o uso do CEP aplicado à colheita mecanizada possibilita maior precisão no ajuste das regulagens da colhedora, contribuindo para a redução de perdas e a melhoria contínua da qualidade operacional.

Palavras-chave: controle de qualidade, controle de processo métodos estatísticos, milho colheita, perdas durante a colheita, produtividade agrícola.

ABSTRACT

Maize mechanized harvesting is a critical stage of the production process, since excessive losses can compromise both profitability and crop sustainability. In this context, Statistical Process Control (SPC) emerges as a tool capable of identifying variations, monitoring operational quality, and indicating the most appropriate adjustments for the combine harvester. This study aimed to determine operating settings that provide a more stable and less variable harvesting process in maize by applying control charts as a tool for evaluating operational quality. The experiment was carried out in an experimental area of the Faculty of Agricultural and Veterinary Sciences, UNESP, Jaboticabal (SP), using the AG8701 PRO4 hybrid in 2023/2024. Morphological and physiological variables of the crop (NDVI, height of the first ear insertion, plant height, stem diameter, grain moisture, and yield) were evaluated, as well as harvesting losses, under different combinations of forward speeds (4 and 7 km h⁻¹) and threshing cylinder speeds (5.5 and 7.5 rpm). Descriptive analyses and control charts allowed the identification of common and special causes of variation, highlighting differences among the tested settings. The combination of 7 km h⁻¹ with 5.5 rpm showed greater statistical stability and lower oscillations, being the most suitable adjustment to reduce losses and ensure operational efficiency. Conversely, the combination of 7 km h⁻¹ with 7.5 rpm resulted in pronounced instability and increased losses. It is concluded that the use of SPC applied to maize mechanized harvesting enables greater accuracy in setting adjustments, contributing to loss reduction and the continuous improvement of operational quality.

Keywords: agricultural productivity, harvest losses, maize harvest, process control statistical methods, quality control.

1 INTRODUÇÃO

A cultura do milho (*Zea mays* L.) é considerada uma das mais importantes plantas comerciais originárias das Américas (MIRANDA, et al., 2021). No Brasil, a produção de milho tem se consolidado exponencialmente, sendo um dos principais produtos do agronegócio nacional. De acordo com dados da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), a produção total de milho na safra 2023/2024 foi estimada em 115,72 milhões de toneladas (CONAB, 2024). Porém, de acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), aproximadamente 10% do total de alimentos desperdiçados, se perde durante a colheita (FUNDAÇÃO CARGILL, 2018).

Na colheita mecanizada do milho, as perdas podem se tornar significativas, sobretudo quando não são observadas as regulagens adequadas da colhedora. Mesquita et al. (1998) verificaram que, a partir da velocidade de 550 rpm, as perdas totais ultrapassaram o limite tolerado de 1,5 saca ha⁻¹. Esse resultado evidencia que velocidades de avanço elevadas, associadas a parâmetros inadequados de regulagem, comprometem diretamente a eficiência da colheita. Além de reduzir a produtividade efetiva, as perdas representam desperdício de alimento, favorecem a ocorrência de plantas voluntárias (tigueras) na cultura subsequente e elevam os custos com seu manejo.

Embora as perdas durante a colheita mecanizada sejam inevitáveis, é importante que se mantenham dentro de níveis considerados aceitáveis. De acordo com Silva e Francetto (2025), perdas totais entre 1 % e 2 % da produtividade são consideradas aceitáveis do ponto de vista técnico e econômico. No entanto, estudos recentes demonstram que os valores obtidos em campo muitas vezes superam esses limites. Reis et al. (2023) avaliaram duas variedades de milho submetidas à colheita mecanizada a 3 km h⁻¹ e observaram perdas de 10,4% e 12,1% da produtividade total, respectivamente.

A velocidade de deslocamento da colhedora exerce influência direta sobre as perdas na colheita mecanizada do milho. Segundo Mantovani (2021), a faixa recomendada varia entre 4 e 6 km h⁻¹. Redivo et al. (2018) observaram que velocidades superiores a 6 km h⁻¹ aumentam significativamente as perdas, com destaque para a velocidade de 8 km h⁻¹, que resultou em perdas de 70 kg ha⁻¹, que está relacionado à redução do tempo de permanência do material no sistema de trilha, separação e limpeza. Por outro lado, Loureiro et al. (2012) apontam que velocidades muito baixas, como 3,5 km h⁻¹, também elevam as perdas devido à vibração excessiva da planta, favorecendo o desprendimento precoce das espigas. Nesse estudo, a perda total observada para o espaçamento de 0,45 m foi de 8,2% da produtividade média, indicando

que tanto velocidades elevadas quanto excessivamente baixas comprometem a eficiência da colheita.

Tais perdas ocorrem principalmente pela ausência da observação da variabilidade de variáveis diretamente relacionadas à colheita, como as regulagens da colhedora. Venegas et al. (2012) observaram que a velocidade do cilindro trilhador tem impacto direto nas perdas, sendo que rotações elevadas, como 900 e 1000 rpm, resultaram em perdas reais superiores a 11 sacas por hectare, considerando descontos aplicados pelas unidades armazenadoras, como impurezas, grãos quebrados e sabugo. Esses resultados reforçam a necessidade de ajustes precisos para garantir maior eficiência na colheita e reduzir desperdícios.

Assim, observar a variabilidade de variáveis diretamente relacionadas a colheita, como as perdas, produtividade, índice espectral relacionado a fisiologia da planta e variáveis fitométricas, a partir de controle estatístico, como as cartas de controle, possibilita determinar regulagens que possibilitam um processo de colheita mais estável e menos variável.

A carta de controle é um método de controle estatístico da operação que possibilita observar variações ou oscilações em operações agrícolas que estejam fora dos padrões especificados para o processo. Estudos recentes têm consolidado o uso de cartas de controle como uma ferramenta estatística eficiente para o monitoramento e a melhoria da colheita mecanizada do milho. Soares e Alves (2016) demonstraram que o controle estatístico de processo é viável para avaliar a qualidade operacional da colheita e identificar falhas associadas à umidade dos grãos, presença de plantas daninhas, regulagens inadequadas da colhedora e falhas humanas. Da mesma forma, Zerbato et al. (2013) aplicaram cartas de controle para analisar perdas em diferentes combinações de plataformas de corte e híbridos de milho, revelando instabilidades fora dos limites operacionais esperados. Esses trabalhos evidenciam o potencial das cartas de controle como ferramenta de apoio ao processo de colheita do milho.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Determinar, por meio da aplicação de cartas de controle, regulagens que possibilitem melhor qualidade do processo de colheita mecanizada da cultura do milho.

2.2 Específicos

- I. Verificar a influência de regulagens da unidade de trilha e da velocidade de deslocamento sobre as perdas na colheita;
- II. Avaliar a variabilidade de variáveis relacionadas com a colheita sob distintas regulagens da colhedora;
- III. Determinar as regulagens mais adequadas para minimizar as perdas na colheita.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Cultura do milho

O milho (*Zea mays* L.) é uma planta anual da família Poaceae, pertencente ao grupo das monocotiledôneas, com características morfológicas típicas de gramíneas, como folhas alternas, colmo cilíndrico e sistema radicular fasciculado (PEREIRA et al., 2021). Seu crescimento é determinado, com uma haste principal ereta que pode atingir de 1,5 a 3 metros de altura, dependendo das condições edafoclimáticas e do material genético utilizado. O colmo é dividido em nós e entrenós, sendo responsável pela sustentação da planta e pela inserção das folhas e inflorescências, enquanto sua estrutura foliar favorece a interceptação luminosa e o aproveitamento da radiação solar (CRUZ et al., 2008).

O sistema radicular do milho é do tipo fasciculado, sendo composto inicialmente por raízes primárias, originadas da radícula, que garantem a fixação inicial da plântula e a absorção de água e nutrientes nos primeiros estágios de desenvolvimento (PEREIRA et al., 2021). A cultura possui raízes adventícias responsáveis pelo suporte mecânico e e pela maior parte da absorção hídrica e nutricional da planta (CRUZ et al., 2008). Além disso, o milho pode emitir raízes aéreas ou *brace roots* nos primeiros nós acima do solo, que auxiliam na sustentação em condições de ventos fortes e aumentam a eficiência na captação de nutrientes, principalmente em solos profundos e bem estruturados (PEREIRA et al., 2021).

O colmo do milho é uma estrutura cilíndrica e ereta, composta por nós e entrenós, que sustenta a planta e abriga os feixes vasculares responsáveis pelo transporte de água e nutrientes (PEREIRA et al., 2021). As folhas são inseridas alternadamente ao longo do colmo e apresentam bainha, lígula, aurícula e lâmina; enquanto a bainha protege o colmo, a lâmina maximiza a captação de luz, e a lígula evita a entrada de partículas e água nas articulações foliares (CRUZ et al., 2008).

O milho é planta monoica, com inflorescência masculina (pendão) localizada no ápice da planta, composta por espiguetas que liberam pólen no período reprodutivo. A inflorescência feminina é a espiga, inserida nas axilas das folhas, contendo espiguetas femininas das quais emergem que capturam o pólen. A polinização ocorre predominantemente por ação do vento, favorecendo fecundação cruzada, o que promove variabilidade genética e desenvolvimento de grãos viáveis. Essa descrição está alinhada com Silva et al. (2021), que revisaram características morfológicas, arquitetura de planta, inserção de espiga e densidade de plantio em diferentes cultivares de milho, destacando a importância da uniformidade desses atributos para desempenho agrônômico estável.

O grão de milho, classificado botanicamente como uma cariopse, é composto por quatro estruturas principais: pericarpo (casca), endosperma, gérmen (embrião) e pedicelo (ponta), cada uma com funções e composições específicas (ARCANJO, et al. 2024). O endosperma representa cerca de 83% do grão, sendo a principal reserva de amido, enquanto o gérmen, que contém o embrião, representa aproximadamente 11% e é rico em lipídios e proteínas (ARCANJO, et al. 2024).

O milho é uma das principais culturas do agronegócio brasileiro, com produção estimada em 126,9 milhões de toneladas na safra 2024/25, crescimento de 9,9% em relação à anterior, impulsionado por clima favorável e avanços tecnológicos (CONAB, 2025). A cadeia movimenta bilhões de reais, com destaque para a pecuária intensiva, a indústria de ração e o etanol de milho, em expansão no Centro-Oeste (EMBRAPA, 2021). Em 2021, o Valor Bruto da Produção (VBP) do milho superou R\$ 64 bilhões, evidenciando sua importância estratégica (MIRANDA et al., 2021).

A relevância do milho no agronegócio brasileiro está diretamente ligada à diversidade de sistemas de produção adotados no país, que variam do cultivo familiar de subsistência a modelos altamente tecnificados. Essa heterogeneidade explica a capacidade de atender diferentes demandas e sustenta a posição do Brasil entre os maiores produtores mundiais.

3.2 Sistema de Produção do Milho

No Brasil, o milho é cultivado sob diferentes sistemas de produção. Entre esses, destaca-se o sistema adotado pelo produtor comercial de grãos, que utiliza grandes áreas, tecnologia de ponta e predomina nas regiões mais produtivas do país. Esse sistema, baseado no plantio direto e na rotação com soja, visa exclusivamente à comercialização, sendo responsável por grande parte do abastecimento nacional (PEREIRA FILHO, 2015). A homogeneização das práticas e o uso eficiente de insumos tornam esse modelo altamente competitivo, com produtividade comparável à de países com agricultura desenvolvida.

O manejo adequado do solo é essencial para a produtividade e sustentabilidade do milho, pois influencia diretamente o estabelecimento da cultura, o controle de plantas daninhas e a conservação do ambiente (PEREIRA FILHO, 2015). Entre os sistemas adotados, destaca-se o plantio direto, que melhora as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo por meio da manutenção da palhada. Já os sistemas convencionais utilizam aração e gradagem. Como muitos solos brasileiros são ácidos e pobres em nutrientes, práticas como calagem, gessagem, rotação de culturas e adubações equilibradas são fundamentais para garantir bons resultados agronômicos (PEREIRA FILHO, 2015).

A absorção e o acúmulo de nutrientes variam conforme o estágio fenológico, sendo críticos no florescimento e enchimento de grãos para elementos como nitrogênio, potássio e fósforo. Essa dinâmica foi evidenciada por Borin et al. (2010), que demonstraram como a absorção, acúmulo e exportação de macronutrientes no milho aumentam de modo significativo durante fases fenológicas como florescimento e enchimento de grãos, reforçando que manejos de adubação devem se ajustar a essas exigências para otimizar qualidade e rendimento.

O milho está sujeito à ocorrência de diversas pragas e doenças ao longo de todo o ciclo, desde a semeadura até a colheita. A lagarta-do-cartucho, percevejos, larva-alfinete e cigarrinha-do-milho destacam-se como pragas-chave, especialmente no cultivo da safrinha (WORDELL FILHO et al., 2016). Além disso, doenças como manchas foliares e podridões do colmo e da espiga podem comprometer a produtividade. O manejo fitossanitário eficiente envolve práticas integradas como uso de cultivares resistentes, tratamento de sementes, rotação de culturas, adubação equilibrada e controle químico quando necessário, visando reduzir o inóculo e fortalecer a sanidade da lavoura (WORDELL FILHO et al., 2016).

O ciclo do milho pode ser determinado em número de dias da semeadura até o florescimento (pendoamento), maturação fisiológica ou colheita, sendo influenciado por fatores genéticos e ambientais. As cultivares são classificadas em superprecoces, precoces, semiprecoces e normais, conforme as unidades de calor acumuladas até o florescimento, embora essa divisão não seja rígida e possa variar com as condições de cultivo (CRUZ et al., 2008). Além disso, há diferenças entre os híbridos quanto à taxa de secagem dos grãos após a maturação, o que afeta o momento ideal de colheita. A escolha adequada do ciclo é estratégica em sistemas com sucessão de culturas ou plantios escalonados.

A adoção de sistemas produtivos tecnificados, com manejo eficiente do solo, controle fitossanitário e escolha adequada de cultivares, culmina em lavouras de alta produtividade que exigem colheita precisa e eficiente. Nesse contexto, a colheita mecanizada assume papel fundamental, pois representa a etapa final do ciclo agrícola e influencia diretamente a conservação da qualidade dos grãos e a rentabilidade da produção (PEREIRA FILHO, 2015).

3.3 Colheita Mecanizada do Milho

Segundo a Massey Ferguson (2023), a colheita mecanizada no Brasil teve início em 1939 com a introdução da Massey-Harris 20, o que representou um marco na transição do processo manual para o uso de colhedoras autopropelidas. Desde então, as máquinas evoluíram significativamente, incorporando plataformas com esteiras, sensores e sistemas automatizados. Atualmente, essas tecnologias aumentam a eficiência, reduzem perdas e otimizam a operação

no campo. Como destacam Silva e Francetto (2025), colhedoras modernas oferecem maior capacidade de trabalho e qualidade no produto colhido, embora ainda demandem elevado investimento, operadores qualificados e áreas com boa uniformidade topográfica.

A colheita mecanizada é a última etapa do processo produtivo e tem papel decisivo no sucesso da lavoura, especialmente em culturas como o milho, em que perdas podem representar prejuízos significativos. A utilização de colhedoras modernas permite maior eficiência operacional, redução do tempo de colheita e menor dependência de mão de obra, fatores essenciais em sistemas de produção em larga escala (SILVA; FRANCETTO, 2025).

A classificação das colhedoras quanto ao fluxo do material colhido está relacionada à forma como o produto percorre os mecanismos internos da máquina durante os processos de trilha e separação. De modo geral, esse fluxo pode ocorrer de maneira tangencial, axial ou híbrida, dependendo da disposição dos componentes e do caminho percorrido pelo material colhido. Cada sistema apresenta particularidades construtivas que influenciam diretamente a eficiência da operação, o desgaste das peças e a qualidade dos grãos (SILVA; FRANCETTO, 2025).

As colhedoras de fluxo tangencial (Figura 1) utilizam cilindro e côncavo dispostos perpendicularmente à direção de deslocamento da máquina. Nesse sistema, o material apenas tangencia o cilindro, sem envolvê-lo completamente, sendo conduzido até os saca-palhas por gravidade. Trata-se do sistema tradicional, também conhecido como colhedora convencional, no qual a trilha ocorre por atrito e impacto, e a separação é realizada por vibração (SILVA; FRANCETTO, 2025).

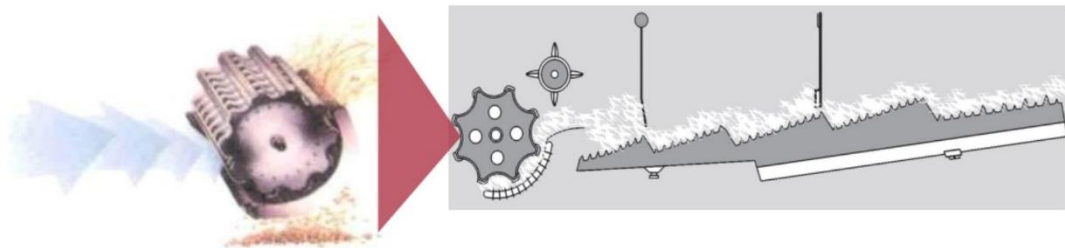


Figura 1 - Sistema de trilha das colhedoras de fluxo tangencial.

Fonte: Massey Ferguson 2025.

Por outro lado, nas colhedoras de fluxo axial (Figura 2), o material colhido percorre um rotor alongado disposto no sentido longitudinal da máquina. Nesse sistema, as plantas envolvem completamente o rotor, sendo trilhadas e separadas simultaneamente ao longo do

percurso entre o rotor giratório e um côncavo fixo perfurado. Essa configuração confere maior suavidade no manuseio do material e maior capacidade de processamento por unidade de tempo (SILVA; FRANCETTO, 2025).



Figura 2 - Sistema de trilha das colhedoras de fluxo axial.

Fonte: Massey Ferguson 2025.

As colhedoras híbridas (Figura 3) combinam os dois princípios anteriores: a trilha é realizada tangencialmente, como nas colhedoras convencionais, enquanto a separação é feita por dois rotores com fluxo axial, um girando no sentido horário e outro no anti-horário. Esse sistema visa unir a agressividade controlada na trilha com a eficiência e suavidade da separação axial, otimizando o rendimento da máquina e reduzindo perdas. A adoção desse sistema atende às exigências de lavouras de maior escala e produtividade, bem como às condições mais intensivas de colheita, incluindo áreas declivosas. (SILVA; FRANCETTO, 2025).



Figura 3- Sistema de trilha das colhedoras híbridas.

Fonte: Massey Ferguson 2025.

3.4 Perdas na Colheita do Milho

A colheita mecanizada do milho representa a última etapa do ciclo produtivo e, portanto, desempenha papel decisivo na consolidação da rentabilidade agrícola. Sua eficiência está diretamente relacionada à capacidade de minimizar perdas, as quais podem comprometer de forma significativa os investimentos realizados ao longo do cultivo. Essas perdas decorrem, em grande parte, de regulagens inadequadas da colhedora, da adaptabilidade da cultivar à mecanização e de fatores ambientais, exigindo monitoramento contínuo e técnicas de ajuste precisas (SILVA; FRANCETTO, 2025). A compreensão das principais fontes de perdas é, portanto, fundamental para otimizar o desempenho da colheita e garantir maior aproveitamento da produção.

As perdas durante a colheita mecanizada do milho estão diretamente relacionadas à velocidade de operação da colhedora, sendo esta definida conforme a produtividade da lavoura e a capacidade da máquina em processar a massa colhida. Segundo Mantovani (2021), a faixa recomendada de velocidade varia entre 4 e 6 km h⁻¹, e decisões que envolvam o aumento dessa velocidade devem considerar não apenas a capacidade operacional em hectares por hora, mas também a manutenção de perdas dentro dos limites toleráveis, tradicionalmente estabelecidos em até 1,5 saca por hectare. A negligência nesse equilíbrio compromete a eficiência do processo e acarreta prejuízos significativos à produção.

As perdas na colheita mecanizada do milho podem ser classificadas em quatro tipos principais: pré-colheita, na plataforma, grãos soltos e grãos nos sabugos. As perdas pré-colheita ocorrem ainda no campo, antes da entrada da máquina, e estão relacionadas à resistência da cultivar ao acamamento e ao quebramento do colmo. As perdas na plataforma, geralmente as mais significativas, são causadas por falhas na regulagem da colhedora e pela inadequação da cultivar à máquina, como variação na altura de inserção das espigas ou densidade de plantio incompatível com a largura da plataforma. Já as perdas de grãos soltos e nos sabugos estão diretamente ligadas à má regulagem do sistema de debulha e separação, sendo influenciadas por fatores como velocidade do cilindro, folga entre côncavo e barras, ou excesso de umidade nos grãos (MANTOVANI, et al. 2015). A escolha da rotação ideal entre 400 a 800 rpm deve considerar o teor de umidade para minimizar as perdas em cada situação (MANTOVANI, et al. 2015).

A avaliação técnica das perdas exige a distinção entre perdas naturais que ocorrem antes da entrada da colhedora no campo e as perdas provocadas pelas unidades da máquina, como plataforma, trilha, separação e limpeza. A quantificação correta deve considerar todas essas etapas e pode ser realizada com armações retangulares de área conhecida, posicionadas

transversalmente à linha de plantio para coletar os grãos perdidos. Essa metodologia, aliada à análise da produtividade da lavoura, permite estimar as perdas reais em kg ha^{-1} e identificar pontos críticos do processo. Mesmo com o avanço das tecnologias embarcadas, a aferição manual das perdas continua sendo uma prática indispensável para garantir eficiência e controle operacional no campo (SILVA; FRANCETTO, 2025).

Embora as perdas durante a colheita mecanizada do milho sejam inevitáveis, elas devem ser mantidas dentro de níveis considerados aceitáveis para que não comprometam a rentabilidade da produção. De acordo com Portela (2001), perdas totais — que englobam espigas inteiras, grãos soltos e grãos ainda no sabugo — de até 4% da produtividade são toleráveis do ponto de vista técnico e econômico. Já Mesquita et al. (1998) sugerem um limite mais rigoroso, de até 1,5 saca por hectare. No entanto, estudos recentes demonstram que os valores obtidos em campo muitas vezes superam esses limites. Reis et al. (2023), por exemplo, avaliaram duas variedades de milho e constataram perdas totais de $600,1 \text{ kg ha}^{-1}$ na variedade K 9606 VIP3 e $470,1 \text{ kg ha}^{-1}$ na RB 9006, correspondendo a 10,4% e 12,1% da produtividade, respectivamente, índices bem acima do recomendado. Essas perdas representaram prejuízos econômicos superiores a R\$ 400,00 por hectare, evidenciando o impacto financeiro direto causado por falhas na operação de colheita.

Além da velocidade de deslocamento, as regulagens dos componentes internos da colhedora exercem papel crucial na eficiência da colheita mecanizada do milho. Lima (2025) demonstrou que ajustes simples, como a regulagem adequada da peneira 1 entre as posições 5 e 6, podem reduzir de forma significativa a perda de grãos. O autor também destacou a importância da abertura correta do côncavo, da rotação do cilindro debulhador e da capacitação técnica dos operadores para evitar perdas mecânicas, presença de grãos no sabugo e redução da qualidade final do produto. De forma complementar, Venegas et al. (2012) verificaram que rotações elevadas do cilindro de trilha, como 900 a 1000 rpm, resultam em perdas superiores a 11 sacas por hectare, especialmente por quebra de grãos, excesso de impurezas e presença de sabugo nos lotes armazenados. Esses resultados reforçam a necessidade de calibrações precisas e frequentes da máquina para garantir a eficiência do processo e minimizar perdas.

Nesse contexto, uma das estratégias mais eficazes para reduzir perdas na colheita do milho é a adoção de regulagens adequadas e da velocidade correta de operação da colhedora. A eficiência dessas práticas pode ser avaliada por meio do Controle Estatístico do Processo (CEP), que utiliza cartas de controle para monitorar a estabilidade operacional ao longo do tempo. Esse acompanhamento permite identificar variações fora do padrão que comprometem a eficiência da colheita e, a partir disso, adotar medidas corretivas em tempo hábil. Assim, o

CEP contribui para a padronização das operações, a detecção de falhas específicas e a melhoria contínua da qualidade da colheita, consolidando-se como uma ferramenta essencial para garantir maior rentabilidade e sustentabilidade na mecanização agrícola (ZERBATO et al., 2013).

3.5 Controle Estatístico

O Controle Estatístico do Processo (CEP) é uma ferramenta estatística utilizada originalmente nas indústrias para monitorar e melhorar a qualidade de produtos por meio da redução sistemática da variabilidade do processo. Seu princípio baseia-se na detecção de causas especiais de variação, que, uma vez identificadas, permitem ações corretivas e preventivas. As cartas de controle são o principal instrumento do CEP, permitindo a visualização da estabilidade do processo ao longo do tempo por meio de dados coletados em amostragem contínua. As cartas de controle desenvolvidas por Walter A. Shewhart na década de 1920, fornecem uma representação gráfica da variabilidade, auxiliando na tomada de decisões para garantir a qualidade e consistência da produção (RIBEIRO; TEN CATEN, 2012).

As cartas de controle vêm sendo utilizada na agricultura, começou com Lopes 1995, que utilizou o controle de qualidade na cana de açúcar e chegaram a conclusão que os índices de variação encontrados nas áreas analisadas forma elevadas (SILVA; FRANCETTO, 2025).

Essa ferramenta tem se mostrado eficaz na agricultura, especialmente para monitorar a qualidade da colheita mecanizada do milho. Soares e Alves (2016) utilizaram cartas de controle por variáveis para avaliar as perdas totais durante a colheita, identificando falhas operacionais e destacando a viabilidade do CEP como método para melhoria contínua do processo. O estudo recomendou ajustes como colheita com umidade adequada, controle mais eficiente de plantas daninhas, regulagem da colhedora e capacitação do operador. Em outro trabalho, Zerbato et al. (2013) avaliaram duas plataformas de corte em dois híbridos de milho e constataram, por meio das cartas de controle, instabilidades no processo de colheita e diferenças nos padrões de perdas entre as plataformas. Os autores observaram que, embora a plataforma B tenha apresentado menor variação para a cultivar 2, ainda operava fora de controle estatístico, evidenciando a importância da análise contínua para garantir eficiência operacional.

A qualidade de um processo mecanizado na agricultura, como a colheita do milho, está diretamente ligada à sua capacidade de operar com mínima variabilidade e máxima eficiência. De acordo com Silva, Voltarelli e Cassia (2015), todo processo produtivo está sujeito a causas comuns e causas especiais de variação. As causas comuns representam a variabilidade natural do processo e são difíceis de eliminar sem mudanças estruturais profundas. Por outro lado, as

causas especiais ocorrem de forma pontual e imprevisível, sendo geralmente relacionadas a falhas específicas que podem ser corrigidas com ajustes direcionados.

A identificação dessas causas pode ser organizada com base no modelo dos 6M, Mão de obra, Máquina, Matéria-prima, Método, Medição e Meio ambiente, que abrange os principais fatores responsáveis por variações operacionais. Na Tabela 1, adaptada de Trindade et al. (2007), são ilustrados exemplos práticos dessas causas e suas implicações nos processos agrícolas. Quando associadas ao uso de cartas de controle, essas análises fornecem uma base estatística e gerencial para a detecção precoce de falhas, tornando possível o aprimoramento contínuo da qualidade nas operações de colheita mecanizada.

Tabela 1 - Causas especiais em um processo agrícola e suas explicações

Fator (6M)	Explicação
Mão de obra	Diferenças entre operadores, falta de treinamento ou preparo inadequado.
Máquina	Desgaste, uso incorreto, regulagem inadequada ou falta de manutenção dos equipamentos.
Matéria-prima	Variações naturais entre unidades da matéria-prima (ex.: diferentes cultivares, umidade, qualidade).
Método	Ausência de padronização nos procedimentos operacionais ou execução inadequada.
Medição	Coleta inadequada de amostras ou erros na interpretação dos dados de campo.
Meio ambiente	Fatores ambientais como temperatura, umidade, chuvas ou insolação, influenciando o processo.

Fonte: Adaptado de TRINDADE et al. (2007).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização do Local de Estudo

O experimento foi conduzido na área experimental da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal (SP), localizada nas coordenadas geodésicas: latitude 21°15'9.68"S e longitude 48°16'26.50"O, com altitude média de 560 metros (Figura 4). A área experimental compreendeu 10 hectares com solo classificado como Latossolo Vermelho Eutroférico, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999). O clima predominante da região é AW subtropical, segundo a classificação de Köppen.

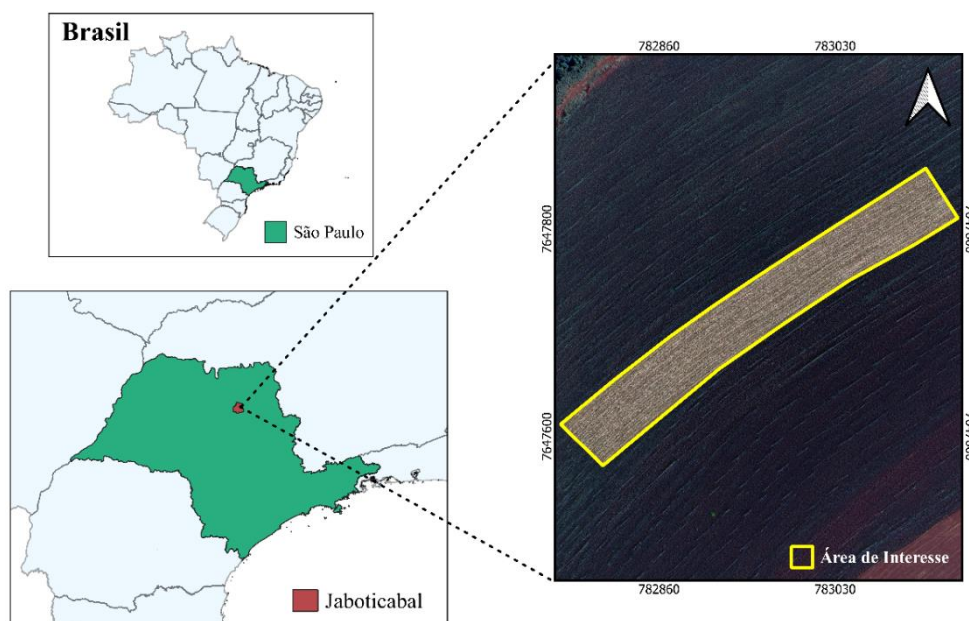


Figura 4- Mapa de localização da área de estudo.
Fonte: Os autores 2025.

A semeadura foi realizada no dia 12 de dezembro de 2023 em sistema convencional, com espaçamento de 0,45 metros entre linhas. O híbrido de milho utilizado foi AG8701 PRO4 adubado com 300 kg ha⁻¹ de 04-28-08 (NPK), 200 kg ha⁻¹ de 19-04-19 (NPK) e 200 kg ha⁻¹ de 27-00-00 (NPK), aplicados no plantio, estágio V4 e V8, respectivamente.

O manejo da área foi conduzido conforme as recomendações técnicas descritas no Sistema de Produção do Milho da EMBRAPA, com controle de pragas, doenças e plantas daninhas realizado de acordo com a necessidade observada ao longo do ciclo da cultura.

4.2 Variáveis de Campo

Foram coletadas em campo as variáveis de produtividade, umidade, perdas, altura de planta, altura de inserção da primeira espiga (AIPE), umidade (%) e diâmetro do colmo, para cada variável foi amostrado 80 pontos.

A produtividade (kg ha⁻¹) foi estimada com base na colheita manual das espigas em duas fileiras de milho, com espaçamento de 0,45 m, por um metro de comprimento, totalizando uma área de 0,9 m². As espigas foram debulhadas por uma trilhadora mecânica manual e os grãos pesados em balança analítica, sendo os resultados expressos em quilogramas por hectare.

A umidade dos grãos foi determinada em campo por meio do medidor eletrônico G600, da marca Gehaka Agri, diretamente nos pontos amostrados, de acordo com as orientações do fabricante.

A colheita foi realizada com a colhedora Massey Ferguson híbrida, operando nas velocidades de 4 e 7 km h⁻¹ e com configuração do cilindro trilhador ajustada para 550 e 750 rpm. Foram realizados 80 pontos amostrais, 20 pontos para cada condição de regulagens da colhedora, conforme a Figura 5.

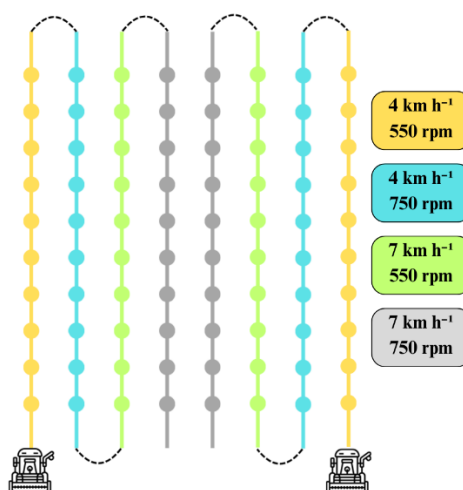


Figura 5- Área amostral da coleta dos pontos.
Fonte: Os autores 2025.

As perdas foram avaliadas pelo método das armações retangulares de 1 m², posicionadas em pontos previamente determinados após a passagem da colhedora. Os grãos contidos dentro das armações foram coletados, pesados e os valores convertidos para quilogramas por hectare. Quando havia espigas inteiras dentro da armação, as perdas foram estimadas considerando uma área de 10 m². Esse procedimento, utilizando armações de 1 m², é amplamente adotado em estudos de perdas na colheita, servindo como referência para amostragem retangular (EMBRAPA, 1978).

A altura das plantas foi mensurada utilizando uma régua de madeira com marcações em metros e centímetros, sendo considerada a distância do solo até o topo da planta.

O diâmetro do colmo foi medido na base da planta (próximo ao solo), utilizando um paquímetro manual. Como o colmo do milho não possui formato perfeitamente circular, foram realizadas duas medições perpendiculares entre si em cada planta, sendo posteriormente calculada a média entre os dois valores para representar o diâmetro.

4.3 Dados espectrais

O uso de um índice de vegetação, como o NDVI, foi adotado com o objetivo de observar a variabilidade fisiológica da cultura do milho na área experimental. Essa abordagem permitiu avaliar a resposta das plantas nas diferentes faixas de regulagens utilizadas durante a colheita mecanizada, fornecendo uma medida indireta da reflectância do dossel vegetal. Como o NDVI está diretamente relacionado à atividade fotossintética e ao vigor da vegetação, sua aplicação possibilitou identificar padrões de estresse ou variações de desenvolvimento nas regiões por onde a colhedora passou, associando essas diferenças ao desempenho operacional de cada regulagem testada. Assim, o índice atuou como uma ferramenta complementar na análise da eficiência da colheita e na identificação de possíveis impactos fisiológicos nas plantas remanescentes.

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), cujos valores estão dispostos na Tabela 2, foi obtido a partir de imagem orbital registrada em 28 de fevereiro de 2024, aos 78 dias após a semeadura, período correspondente ao início do enchimento de grãos. Foram amostrados 80 pontos, coincidentes com aqueles utilizados para as variáveis de campo. As imagens foram adquiridas pela constelação PlanetScope, cujos sensores operam em órbita terrestre baixa, com resolução espacial de 3 m, revisita diária e oito bandas espectrais, incluindo o infravermelho próximo (NIR), características que as tornam adequadas para o monitoramento agrícola de alta frequência (PLANETSCOPE SPECIFICATIONS, 2025). O cálculo do índice foi realizado no software QGIS, utilizando a calculadora raster e a equação proposta por Rouse et al. (1974).

Tabela 2 - Índice NDVI

Nome do Índice	Fórmula	Referência
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$(\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED})$	ROUSE et al., 1974
NIR (Infravermelho próximo); RED (Banda do vermelho).		PlanetScope

Fonte: Fonte: Os autores 2025.

4.4 Delineamento Experimental e Análise Estatística

O delineamento experimental seguiu as premissas do Controle Estatístico de Processo, com as amostras sendo coletadas ao longo do tempo. Foram utilizadas cartas de controle para valores

individuais, com estágios definidos pelas regulagens adotadas. Nessas cartas os limites de controle foram determinados de acordo com as equações 1 e 2:

$$LSC = \bar{x} + 3\sigma \quad \text{Eq.1}$$

$$LIC = \bar{x} - 3\sigma \quad \text{Eq.2}$$

Em que,

LSC: limite superior de controle;

\bar{x} : média dos dados observados;

LIC: limite inferior de controle.

Para as variáveis expressas em porcentagem, o LSC foi limitado a 100%, enquanto para as perdas o LIC foi limitado a 0, uma vez que não existem valores acima ou abaixo destes limites, respectivamente.

Antes da aplicação do controle estatístico por meio de cartas de controle, foi realizada uma análise descritiva das variáveis coletadas com o objetivo de compreender o comportamento dos dados, sua distribuição e variabilidade. Essa etapa incluiu o cálculo de parâmetros estatísticos como média, desvio-padrão, coeficiente de variação (CV), curtose e assimetria. O coeficiente de variação foi utilizado como medida de dispersão relativa, útil para comparar a variabilidade entre variáveis de naturezas distintas. A curtose foi analisada para avaliar o grau de concentração dos dados em torno da média: valores positivos indicam maior concentração e presença de picos extremos (leptocúrtica), enquanto valores negativos sugerem distribuição mais achatada (platicúrtica) e valores próximos a zero levemente mais pontiaguda do que a normal, mas ainda bastante semelhante à distribuição normal. Já a assimetria serviu para verificar a simetria da distribuição dos dados; valores positivos indicam cauda longa à direita (assimetria positiva), e valores negativos, cauda à esquerda (assimetria negativa). Esses indicadores forneceram a base para a interpretação das cartas de controle e auxiliaram na identificação prévia de possíveis causas comuns ou especiais de variação nas variáveis analisadas.

A relação das variáveis de campo e espectrais estudadas foi avaliada seguindo o princípio do controle estatístico por meio de cartas de controle. Assim, foram criadas cartas de controle de todas as variáveis para as quatro configurações de regulagens, duas velocidades da colhedora (4 e 7 km h⁻¹) e duas velocidades do cilindro trilhador (550 e 750 rpm), utilizando o software

Minitab®. As cartas de controle foram utilizadas como ferramentas para a verificação da variabilidade das variáveis diretamente relacionadas à qualidade da colheita, como produtividade, NDVI, umidade, diâmetro de colmo, altura de planta e AIPE. A carta de controle de perdas foi elaborada especificamente para avaliar a qualidade da colheita, por se tratar da principal variável diretamente influenciada pelas condições de regulagens da colhedora.

As cartas de controle foram construídas com base na média da variável, considerando os limites superior e inferior de controle (LSC e LIC), calculados a partir do desvio-padrão. O LSC foi definido como a média acrescida de três vezes o desvio-padrão, enquanto o LIC foi obtido subtraindo-se esse valor da média, quando maior que zero, foi travado em zero não apresentando valores negativos conforme descrito por Zerbato et al. (2013). Foi elaborada uma tabela única reunindo a média, o LSC e o LIC de todas as variáveis e condições de regulagens da colhedora, permitindo a visualização numérica dos limites de variação e a comparação entre os tratamentos.

A variabilidade de cada variável foi obtida pela diferença entre o LSC e a média. Esses valores foram normalizados por meio da equação (eq.1), permitindo a comparação entre variáveis com diferentes escalas. Os resultados normalizados foram representados em gráfico, possibilitando avaliar a intensidade relativa da variabilidade e sua relação direta com as perdas observadas na colheita.

$$X_{norm} = \frac{(X - X_{min})}{(X_{max} - X_{min})} \quad \text{Eq.1}$$

5 RESULTADOS

5.1 Análise descritiva dos dados

A análise descritiva das variáveis (Tabela 3) permitiu verificar o comportamento de suas distribuições. O NDVI, a Altura de Inserção da Primeira Espiga (AIPE), a altura de planta e o diâmetro do colmo exibiram valores de curtose próximos de zero e baixos índices de assimetria, indicando tendência a uma distribuição normal. Essas variáveis também registraram coeficientes de variação relativamente reduzidos, reforçando a homogeneidade dos dados. Em contrapartida, a umidade dos grãos apresentou curtose negativa (-1,00), com cauda mais achatada, associada a maior dispersão relativa (CV = 31,3%). Já a produtividade e as perdas evidenciaram comportamento assimétrico positivo, com curtose elevada (1,47 e 3,95, respectivamente), caracterizando distribuições não normais, concentradas em valores mais

baixos, mas com ocorrência de picos extremos que ampliaram a variabilidade, resultando nos maiores valores de CV.

Tabela 3 - Análise descritiva dos dados.

Variáveis	Desvio padrão	Curtose	Assimetria	*CV (%)	Mínimo	Máximo	Média
NDVI	0,014	0,065	0,366	0,019	0,708	0,776	0,737
AIPE	0,15	0,33	0,40	0,12	0,90	1,68	1,20
*AP	0,21	0,37	-0,05	0,11	1,38	2,57	1,95
Diâmetro	4,21	0,30	-0,75	0,21	8,65	28,68	20,50
Umidade	0,04	-1,00	0,18	0,31	0,07	0,20	0,12
Produtividade	1484,10	1,47	1,05	0,42	947,56	8496,44	3517,63
Perdas	20,33	3,95	1,60	0,68	1,88	120,60	29,75

*CV= coeficiente de variação; AP= altura de planta.

Fonte: Os autores 2025.

5.2 Variabilidade das variáveis relacionadas à colheita

Na Tabela 4 estão dispostos os limites de controle superior (LSC), inferior (LIC) e os valores médios das variáveis analisadas. Esses dados foram obtidos a partir da aplicação de cartas de controle do tipo \bar{X} (média), possibilitando avaliar a estabilidade e a variabilidade das condições operacionais e fisiológicas das plantas nas diferentes faixas de regulação da colhedora.

Tabela 4 - Parâmetros das variáveis analisadas.

Variáveis	Parâmetros	Regulagens			
		4 km h ⁻¹ 550 rpm	4 km h ⁻¹ 750 rpm	7 km h ⁻¹ 550 rpm	7 km h ⁻¹ 750 rpm
NDVI	LSC	0,771	0,776	0,757	0,752
	\bar{x}	0,743	0,737	0,735	0,732
	LIC	0,715	0,698	0,712	0,712
AIPE (m)	LSC	1,52	1,64	1,50	1,72
	\bar{x}	1,14	1,23	1,16	1,27
	LIC	0,77	0,83	0,81	0,82
Altura de planta (m)	LSC	2,03	2,44	2,82	2,36
	\bar{x}	1,97	2,00	1,94	1,87
	LIC	1,64	1,57	1,06	1,38
Diâmetro (mm)	LSC	25,75	35,49	29,63	29,07
	\bar{x}	18,09	21,85	21,18	20,89
	LIC	10,43	8,20	12,74	12,71

Umidade (%)	LSC	20,12	22,39	24,61	23,19
	\bar{x}	11,81	12,16	14,12	11,47
	LIC	3,50	1,93	3,64	0,00
Produtividade (kg ha ⁻¹)	LSC	6457,00	7129,00	8790,00	4871,00
	\bar{x}	3892,00	3198,00	4430,00	2552,00
	LIC	1327,00	0,00	70,00	232,00
Perdas (kg ha ⁻¹)	LSC	69,26	79,70	71,40	71,60
	\bar{x}	29,34	34,96	26,08	28,62
	LIC	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Os autores 2025.

Na Figura 6 está disposta a carta de controle da variável NDVI, utilizada como indicadora do vigor vegetativo das plantas na área colhida. A média dos quatro tratamentos para o parâmetro observado foi de 0,73, com LIC e LSC de 0,70 e 0,76, respectivamente. Embora a maioria das observações estivesse dentro dos limites de controle estabelecidos, foram identificados três pontos fora de controle estatístico, evidenciando instabilidade no processo de coleta dos dados. Ainda assim, essa variável registrou coeficiente de variação (CV) de apenas 0,01%.

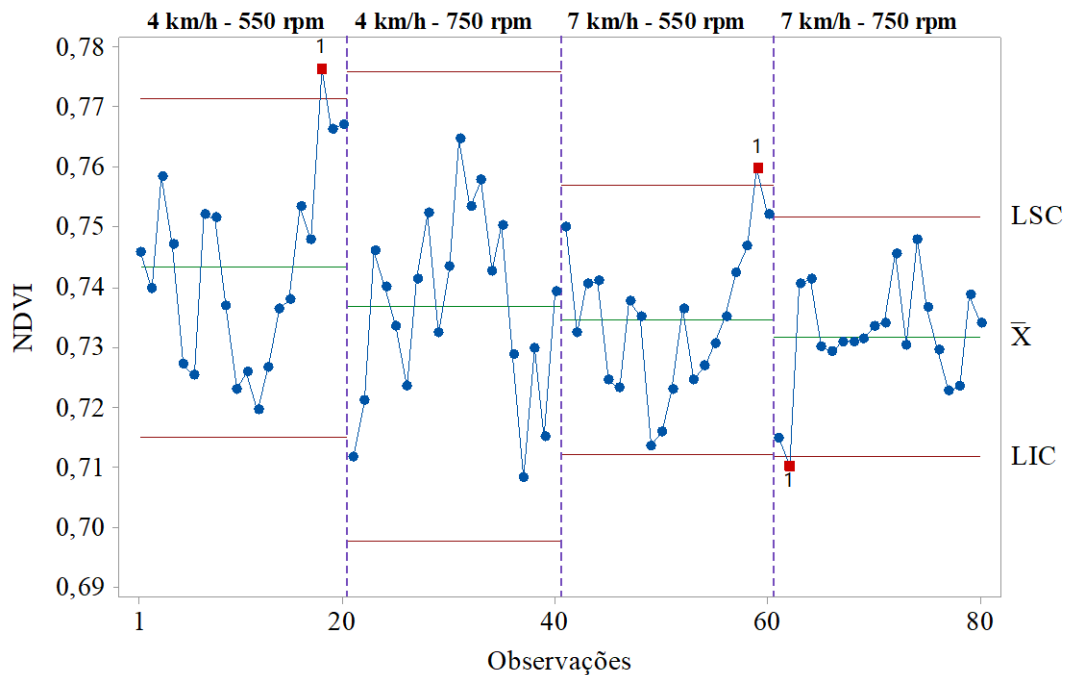


Figura 6 – Carta de controle da variável NDVI.

Fonte: Os autores 2025.

Na Figura 7 está ilustrada a carta de controle da variável altura de inserção da primeira espiga (AIPE), utilizada como parâmetro morfológico associado à colheita. Para as plantas dos quatro tratamentos a média observada foi de 1,20 m, com LIC de 0,80 m e LSC de 1,59 m. Verificou-se que a maior parte das observações permaneceu dentro dos limites estabelecidos; contudo, alguns pontos ultrapassaram o LSC, indicando oscilações pontuais e maior variabilidade na arquitetura da planta, aspecto reforçado pelo coeficiente de variação (CV) de 12,2%. Essa instabilidade sugere diferenças na uniformidade de inserção das espigas ao longo da área colhida, fator que pode influenciar diretamente a eficiência da plataforma de corte.

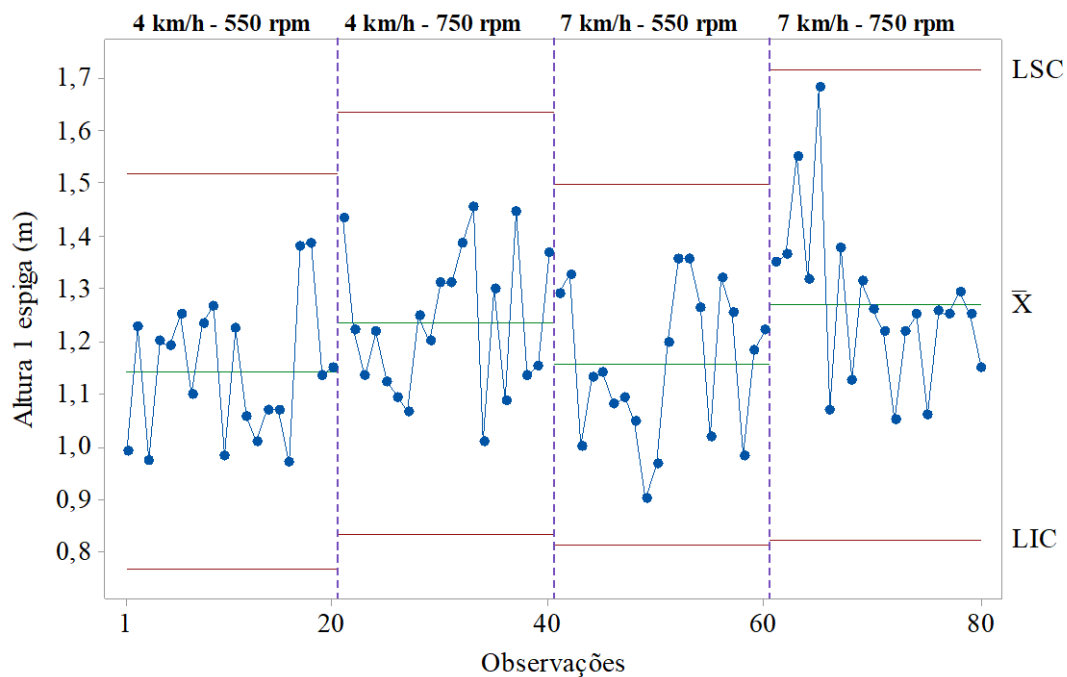


Figura 7 - Carta de controle da altura de inserção da primeira espiga.
Fonte: Os autores 2025.

Na Figura 8 observa-se a carta de controle da variável altura de planta, a qual reflete a arquitetura do dossel e sua influência no processo de colheita mecanizada. A média geral das quatro condições de regulagem foi de 1,94 m, com LIC de 1,41 m e LSC de 2,41 m. Verifica-se que todas as observações permaneceram dentro dos limites de controle, indicando estabilidade do processo e uniformidade da variável ao longo das diferentes regulagens da

colhedora. O coeficiente de variação ($CV = 10,5\%$) reforça essa homogeneidade, demonstrando que a altura das plantas apresentou comportamento consistente em toda a área colhida, sem interferir negativamente na eficiência da colheita mecanizada.

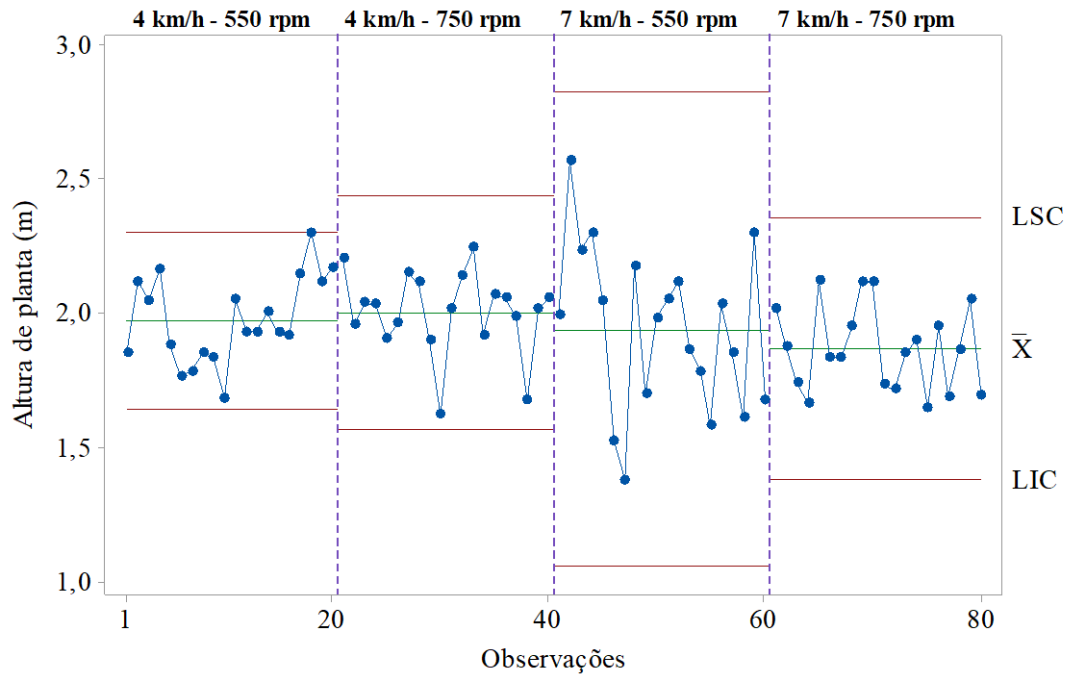


Figura 8 - Carta de controle da altura de planta.
Fonte: Os autores 2025.

Na Figura 9 observa-se a carta de controle da variável diâmetro do colmo, característica estrutural que influencia a sustentação da planta e a eficiência da colheita mecanizada. A média dos tratamentos foi de 20,50 mm, com LIC de 11,02 mm e LSC de 29,99 mm. Embora a maior parte dos pontos tenha permanecido dentro dos limites de controle, foram identificados pontos abaixo do LIC, indicando valores atípicos inferiores. Esses desvios sugerem maior variabilidade ($CV = 20,5\%$) no desenvolvimento do colmo em determinadas regiões da lavoura, possivelmente associada a diferenças de vigor ou a condições específicas de crescimento que afetaram a uniformidade da área.

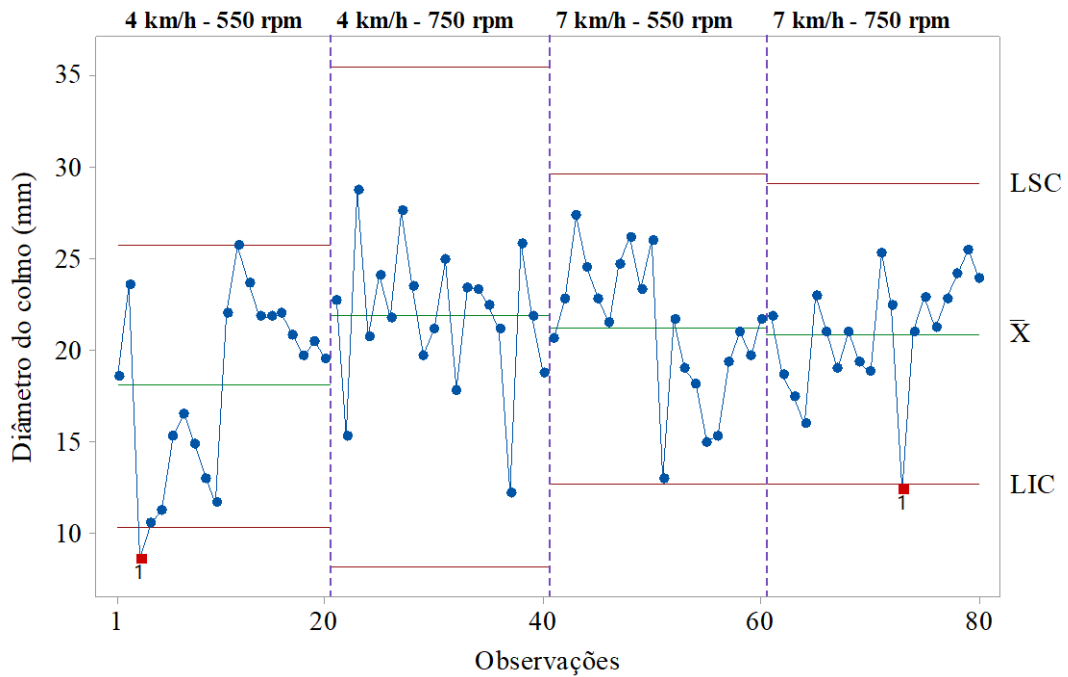


Figura 9 - Carta de controle do diâmetro do colmo.

Fonte: Os autores 2025.

Na Figura 10 estão representados os dados da carta de controle da variável umidade dos grãos, fator diretamente associado à eficiência da debulha e à qualidade final da colheita. A média registrada foi de 12,39%, com LIC de 2,27% e LSC de 22,58%. A maior parte das observações manteve-se dentro da faixa de controle; entretanto, foi identificado um ponto acima do LSC, evidenciando valor atípico de umidade elevada. Essa variável apresentou um dos maiores coeficientes de variação ($CV = 21,2\%$) entre o conjunto analisado, indicando desuniformidade da umidade na área durante o processo de colheita. Importante destacar que, em todos os tratamentos, as médias observadas situaram-se dentro da faixa considerada ideal para a colheita de milho, entre 12% e 15% de umidade, conforme recomendado por Silva et al. (2015).

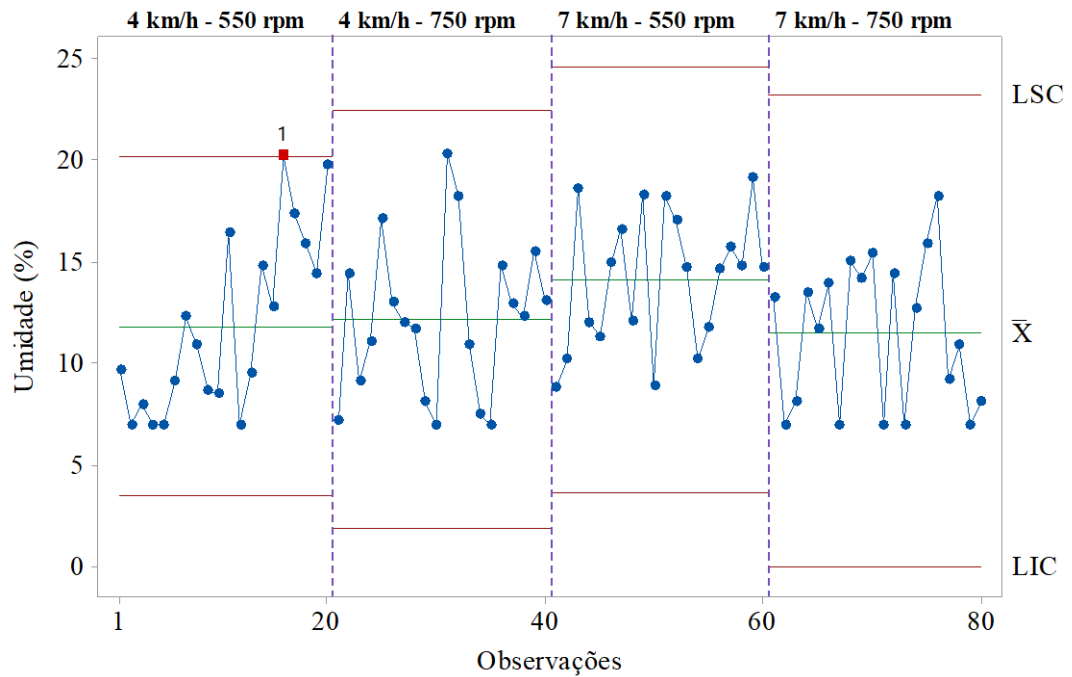


Figura 10 - Carta de controle sobre a umidade.

Fonte: Os autores 2025.

Na Figura 11 observa-se a carta de controle da variável produtividade, utilizada como indicador do rendimento da cultura na área colhida. A média registrada foi de 3518 kg ha^{-1} , com LIC de 407 kg ha^{-1} e LSC de 6811 kg ha^{-1} , o que evidencia elevada variabilidade dessa variável ($CV = 42,1\%$). Embora a maior parte das observações tenha permanecido dentro dos limites de controle, foi identificado um ponto acima do LSC, representando valor de produtividade excepcionalmente alto. Essa oscilação reforça a heterogeneidade da lavoura durante a colheita, condição que pode comprometer a estabilidade operacional da colhedora.

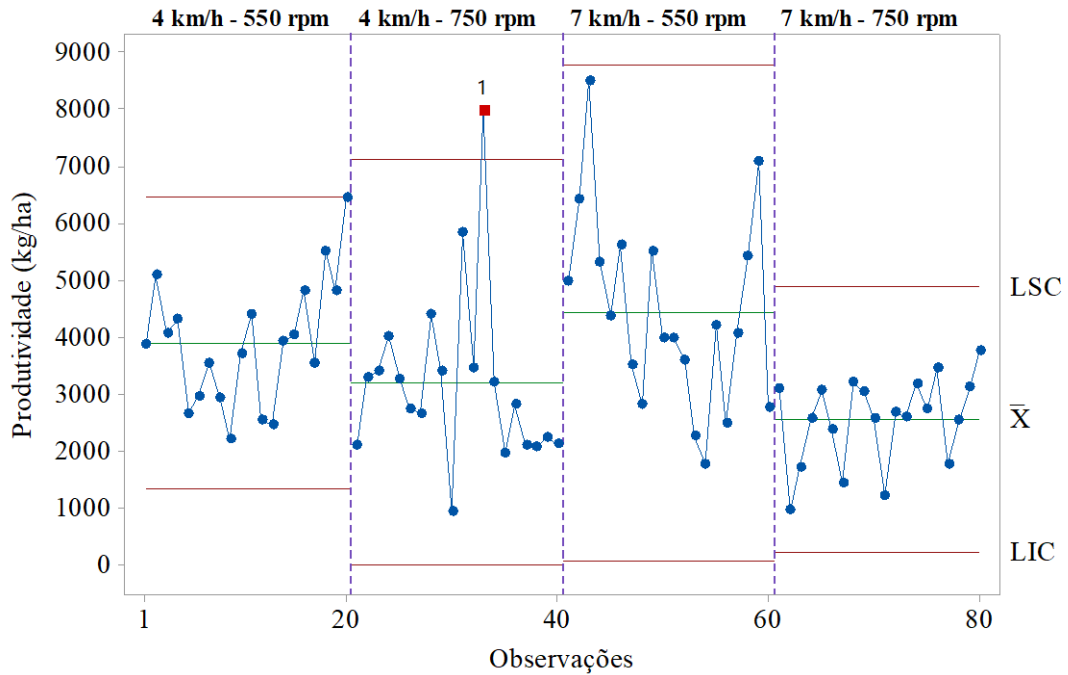


Figura 11 - Carta de controle da produtividade.
Fonte: Os autores 2025.

5.3 Controle estatístico da colheita aplicado às perdas

Na Figura 12 estão dispostos os dados da carta de controle da variável perdas na colheita, considerada o principal indicador da qualidade do processo. A média geral registrada foi de $29,76 \text{ kg ha}^{-1}$, com LSI igual a 0 e LSC de 73 kg ha^{-1} . Embora a maior parte das observações tenha permanecido dentro dos limites, ocorreram pontos acima do LSC, sobretudo na regulagem de $7 \text{ km h}^{-1} - 750 \text{ rpm}$, que apresentou maior instabilidade e maior dispersão dos dados.

A análise descritiva corrobora esse comportamento, mostrando que as perdas tiveram desvio-padrão elevado ($10,16 \text{ kg ha}^{-1}$), forte assimetria positiva (1,60), curtose acentuada (3,95) e coeficiente de variação de 68,3%. Esses parâmetros caracterizam uma distribuição não normal, concentrada em valores baixos, mas com ocorrência de picos extremos. Considerando a estabilidade estatística, a regulagem de $7 \text{ km h}^{-1} - 550 \text{ rpm}$ demonstrou desempenho mais consistente, com menor variabilidade em torno da média e maior proporção de pontos dentro dos limites de controle, configurando-se como a condição mais estável. Em contrapartida, a regulagem de $7 \text{ km h}^{-1} - 750 \text{ rpm}$ revelou-se a menos favorável, com maior instabilidade do processo e ocorrência de pontos fora de controle, indicando maior risco de perdas acentuadas.

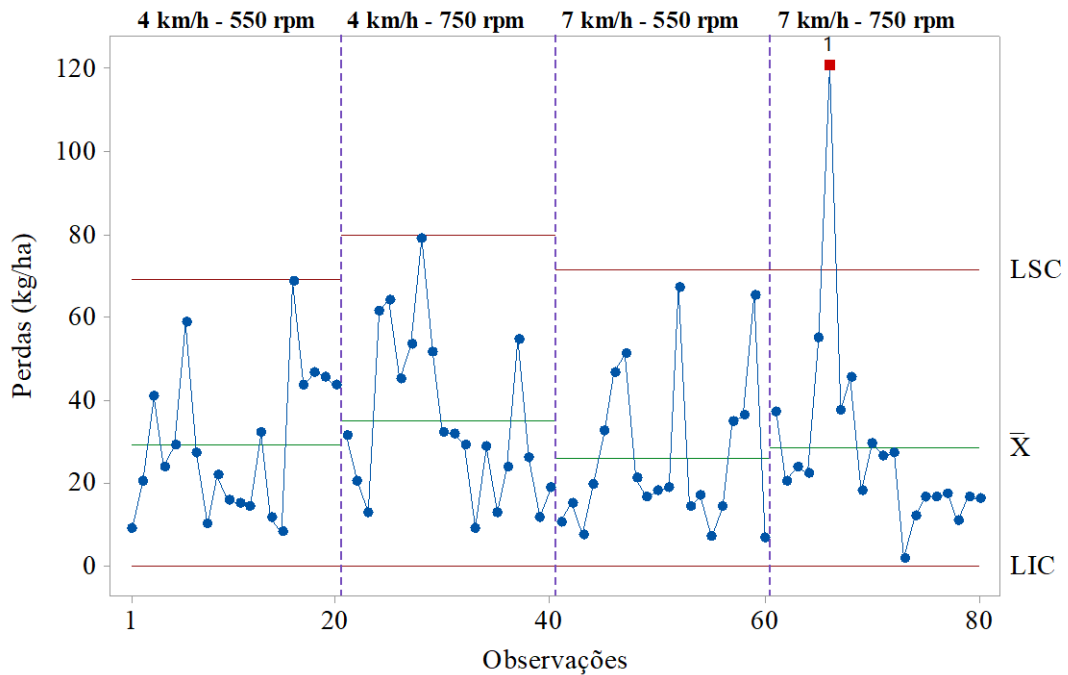


Figura 12 - Carta de controle das perdas na colheita.
Fonte: Os autores 2025.

Conforme a Figura 13, verifica-se a variabilidade das variáveis analisadas (LSC – média), normalizadas para comparação em escala única. Observou-se que, nas combinações de maior velocidade, as perdas foram mais variadas, especialmente quando associadas à maior rotação do rotor. Em 4 km h^{-1} , o aumento de 550 para 750 rpm já elevou a variabilidade das perdas; em 7 km h^{-1} , esse efeito foi intensificado. Assim, a combinação $7 \text{ km h}^{-1} - 750 \text{ rpm}$ apresentou a maior dispersão e instabilidade, refletindo o acúmulo de material no sistema de trilha e separação. De modo consistente, as condições com 550 rpm resultaram em menores perdas em 4 km h^{-1} ($29,34 \text{ kg ha}^{-1}$) e 7 km h^{-1} ($26,01 \text{ kg ha}^{-1}$). Além disso, onde a variabilidade da produtividade e indicadores de vigor (NDVI, altura de planta, altura de inserção da espiga e diâmetro do colmo) foram mais altos, registrou-se tendência a perturbação no processo de colheita, ou seja, maior variabilidade, sugerindo que a maior carga de material processado demandou capacidade operacional superior da colhedora.

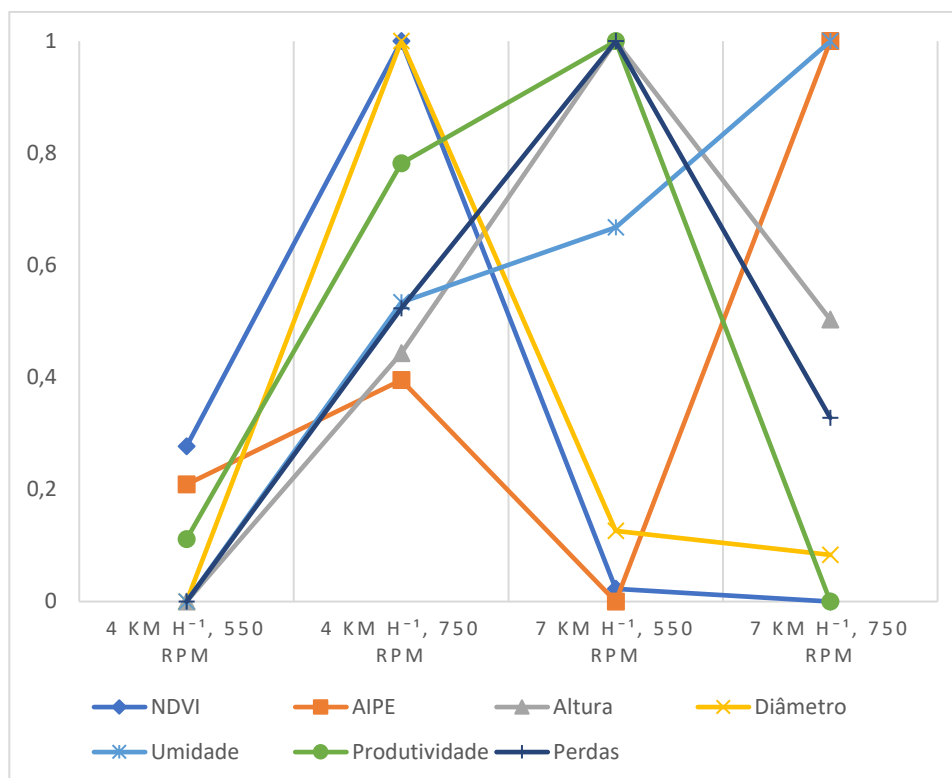


Figura 13- Gráfico sobre a variabilidade das variáveis.
Fonte: Os autores 2025.

6 DISCUSSÃO

6.1 Análise descritiva das variáveis

A análise descritiva revelou diferenças no comportamento das variáveis estudadas, permitindo separar aquelas que apresentaram maior homogeneidade daquelas mais sujeitas a instabilidades. NDVI, altura de inserção da primeira espiga (AIPE), altura de planta e diâmetro do colmo mostraram distribuições próximas da normalidade, com baixa assimetria e curtose próximas de zero. Esse padrão indica que tais atributos apresentaram variabilidade essencialmente associada a causas comuns, ou seja, inerentes ao processo natural de crescimento e desenvolvimento da lavoura. Essa homogeneidade é desejável, pois reflete condições fisiológicas equilibradas, que reduzem a influência da variabilidade do material colhido sobre o desempenho da máquina.

Por outro lado, variáveis como produtividade, umidade e perdas exibiram comportamento distinto, caracterizado por maior dispersão, assimetria positiva e curtose elevada. A produtividade mostrou distribuição com tendência a valores extremos, refletindo a heterogeneidade espacial da área, um fator comum em talhões de milho. A umidade dos grãos

apresentou distribuição platicúrtica, com maior amplitude relativa, evidenciando que parte da lavoura possuía grãos mais secos e outra parte mais úmida, condição que impacta diretamente na eficiência do sistema de trilha e separação. As perdas, por sua vez, destacaram-se como a variável de maior variabilidade, apresentando cauda longa à direita, marcada por ocorrências de valores extremos que fogem ao padrão esperado.

Assim, a análise descritiva forneceu a base para compreender a distribuição dos dados de cada variável estudada. Tal abordagem é essencial para detectar desvios iniciais no comportamento das variáveis, revelando, por exemplo, se há assimetrias, picos extremos (curtose) ou dispersões muito amplas que podem comprometer a validade de comparações posteriores. De acordo com a Embrapa (2022), essa etapa é indispensável para avaliar a natureza dos dados e escolher métodos estatísticos adequados, além de permitir identificar possíveis *outliers* ou inconsistências que possam distorcer conclusões (FREITAS, 2022).

Além disso, trabalhos aplicados à caracterização estatística de variáveis agrícolas também mostram que medidas como coeficiente de variação, curtose e assimetria auxiliam na interpretação dos resultados e na seleção correta de modelos de análise. Nallaiyan et al. (2023) destacaram a importância dessas medidas na avaliação da variabilidade genética e de atributos morfológicos, utilizando distribuições de frequência para identificar diferenças significativas entre características avaliadas. Essa prática possibilita que comparações entre tratamentos sejam feitas com base em pressupostos estatísticos mais sólidos, contribuindo para conclusões confiáveis e para o uso eficaz de ferramentas como cartas de controle.

6.2 Variabilidade das variáveis relacionadas à colheita

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) apresentou comportamento estável dentro dos limites de controle, com variação restrita e predominância das observações sob controle estatístico. O valor médio de NDVI obtido (0,73), correspondente ao estágio de enchimento de grãos, indica plantas com elevado vigor vegetativo e dossel bem desenvolvido, evidenciando condições fisiológicas adequadas da lavoura no momento da colheita. Valores de NDVI nessa faixa ($\geq 0,7$) são característicos de áreas com alta densidade foliar verde e bom desenvolvimento da cultura, o que tende a se correlacionar positivamente com maior potencial produtivo (Wang et al., 2016; Shrestha et al., 2023).

Essa estabilidade do índice reforça sua eficiência como indicador espectral da variabilidade fisiológica da cultura, reduzindo a influência da heterogeneidade no desempenho operacional da colhedora. Resultados semelhantes foram observados por Tamás, Kovács e Ragán (2023), que analisaram a dinâmica do NDVI em experimentos multifatoriais com milho e constataram

que, embora os valores do índice variem entre estádios fenológicos, mantêm tendências consistentes ao longo do ciclo, confirmando seu potencial como ferramenta confiável para o monitoramento do vigor e da uniformidade das lavouras.

As variáveis diretamente associadas à arquitetura e à morfologia das plantas apresentaram, de maneira geral, comportamento estável dentro dos limites de controle. A altura de inserção da primeira espiga (AIPE) e a altura de planta mantiveram desempenho consistente, embora tenham sido registradas oscilações pontuais acima do limite superior de controle. Essas variações refletem diferenças naturais na arquitetura das plantas ao longo do talhão e, embora não comprometam a estabilidade global do processo, podem influenciar a eficiência de captação das espigas pela plataforma em determinadas condições.

Pinto et al. (2019), ao avaliarem diferentes espaçamentos entre linhas de semeadura, observaram que variações no arranjo de plantas interferem diretamente na arquitetura da lavoura, ocasionando diferenças na altura de inserção da espiga e na altura final das plantas. Os autores destacaram que a uniformidade desses atributos é essencial não apenas para a interceptação de luz e eficiência fisiológica, mas também para a regularidade do corte e da alimentação da colhedora. De forma semelhante, Andrzejewski et al. (2020) demonstraram que o desfolhamento em milho promove maior heterogeneidade na arquitetura das plantas, resultando em variabilidade na altura final e na inserção das espigas. Essa condição compromete o rendimento e dificulta a colheita mecanizada, pois a variação na altura das espigas reduz a eficiência de captação da plataforma e aumenta a probabilidade de perdas.

O diâmetro do colmo apresentou comportamento semelhante, com leve tendência à assimetria negativa e ocorrência de valores abaixo do LIC, indicando regiões com colmos mais finos. Essa condição pode estar associada a micro variações ambientais ou nutricionais, mas não comprometeu de forma significativa a estabilidade da operação. Resultados semelhantes foram relatados por Liu et al. (2022), que, ao avaliarem a arquitetura genética do diâmetro do colmo em população de milho, observaram variabilidade significativa nesse atributo, destacando sua importância para a estabilidade estrutural da planta e para a redução de riscos operacionais.

A umidade dos grãos destacou-se pela maior dispersão entre as variáveis avaliadas. A presença de valores acima do LSC evidencia que zonas específicas do talhão, com grãos mais úmidos, influenciaram negativamente a eficiência da debulha e da separação.

Esse comportamento está alinhado com os resultados de Kassa et al. (2025), que observaram que grãos colhidos com teores mais elevados de umidade (17% e 23%) durante a trilha apresentaram maior suscetibilidade a danos, maior ocorrência de grãos quebrados e maior

risco de deterioração no armazenamento, mesmo após secagem para níveis seguros (~13% base úmida). De forma complementar, Galindo et al. (2019) concluíram que a determinação do teor ideal de umidade no momento da colheita do milho permite que produtores realizem ajustes operacionais, como definir a época adequada de colheita, regulagens da colhedora e logística de transporte, reduzindo perdas em condições de variação hídrica no campo.

No contexto operacional, recomenda-se que a colheita do milho seja realizada com teores de umidade de até 15%, faixa considerada ideal para evitar danos mecânicos durante o processo de trilha e separação. Colher grãos acima desse valor aumenta o risco de quebras e perdas, enquanto grãos excessivamente secos tornam-se mais frágeis, apresentando menor elasticidade e maior propensão à quebra pelos mecanismos internos da colhedora. A padronização da umidade para 13% é adotada como base de correção, pois esse teor reduz a atividade microbiana e garante melhor estabilidade do produto durante o armazenamento (SILVA; FRANCETTO, 2025).

A produtividade apresentou comportamento heterogêneo, com amplitude elevada e pontos acima do LSC. Esse resultado indica que a carga de material colhido não foi uniforme, refletindo diretamente na qualidade do processo de colheita. Em áreas mais produtivas, exigiu maior capacidade de processamento da colhedora, favorecendo o surgimento de perdas, enquanto em regiões menos produtivas a máquina operou de forma mais estável.

Resultados semelhantes foram encontrados por Gachoki e Muthoni (2023), que identificaram elevada variabilidade da produtividade do milho em propriedades agrícolas de Gana e Maláui, associada principalmente a diferenças ambientais, de fertilidade do solo e de manejo. Os autores destacaram que a heterogeneidade da produtividade é um fenômeno multifatorial e uma das principais fontes de instabilidade da produção agrícola, exigindo ajustes operacionais dinâmicos para mitigar seus efeitos sobre a eficiência das operações, incluindo a colheita mecanizada.

As variáveis NDVI, AIPE, altura de planta, diâmetro do colmo, umidade e produtividade apresentaram pontos fora de controle que podem ser associados, sobretudo, à Matéria-prima e ao Meio ambiente, pois essas oscilações refletem diferenças no vigor das plantas, relacionadas a variações genéticas, nutricionais e às condições locais de solo e clima. A umidade dos grãos, por sua vez, esteve mais sujeita às condições ambientais de secagem no campo, mas também pode ser afetada pela Máquina, uma vez que regulagens inadequadas ampliam a sensibilidade às variações de teor de água. Já a produtividade, variável fortemente influenciada pela heterogeneidade do talhão, expressa principalmente efeitos da Matéria-prima e do Meio

ambiente, revelando a interação entre o potencial genético, a fertilidade do solo e a disponibilidade hídrica.

Esse padrão é consistente com a interpretação de que múltiplos fatores contribuem para a variabilidade de operações agrícolas. Estudos recentes como Leng et al. (2020) demonstram que a variabilidade espacial e temporal da produtividade de milho pode ser atribuída a diferenças climáticas, manejo, solo e insumos. Da mesma forma, McFadden et al. (2023) destacam que a adoção de tecnologias digitais que envolvem medição, método e máquina contribui para reduzir variações de desempenho. Assim, observa-se que para as variáveis fisiológicas e produtivas, os desvios não decorrem exclusivamente de falhas operacionais pontuais, mas de uma interação entre condições intrínsecas da lavoura e fatores externos como os 6M's no entendimento dessa heterogeneidade.

6.3 Controle estatístico da colheita aplicado às perdas

As perdas na colheita apresentaram-se como a variável de maior instabilidade do processo, refletindo não apenas a variabilidade natural da lavoura, mas sobretudo a influência direta das regulagens da colhedora. As cartas de controle evidenciaram que, embora parte das observações tenha permanecido dentro dos limites, ocorreu um ponto fora do controle acima do LSC em determinadas condições operacionais, caracterizando a presença de causas especiais associadas ao ajuste inadequado da máquina.

As configurações de velocidade reduzida (4 km h^{-1}) mostraram comportamento mais consistente, especialmente quando associadas à rotação de 550 rpm, condição em que teve a menor variabilidade do processo e apresentou a terceira menor média de perda, porém com pouca diferença entre as duas primeiras. Quando a rotação foi elevada para 750 rpm, mesmo com velocidade reduzida, apresentou maior média de perdas e a segunda maior instabilidade, sugerindo que o excesso de agressividade do cilindro trilhador intensificou as perdas por quebra e falhas no sistema de trilha. Esse resultado é coerente com Venegas et al. (2012), que verificaram perdas significativamente maiores em rotações elevadas do cilindro trilhador, associadas ao aumento de grãos quebrados e de impurezas no produto colhido. De forma complementar, Jukić et al. (2024) revisaram diversos estudos sobre fatores que influenciam a quebra de grãos de milho e destacaram que velocidades mais altas de cilindro ou rotor estão diretamente associadas ao aumento de danos mecânicos, reforçando a necessidade de ajustes adequados para minimizar perdas e preservar a qualidade dos grãos.

O aumento da velocidade para 7 km h^{-1} promoveu mudanças relevantes no processo de colheita. Na configuração associada a 550 rpm, observou-se maior instabilidade, porém menor

média de perdas, caracterizando essa condição como a mais eficiente para reduzir perdas. Essa combinação reúne duas vantagens complementares: a maior velocidade de deslocamento aumenta a capacidade de área colhida por unidade de tempo, elevando a eficiência operacional da colhedora, enquanto a rotação mais baixa do cilindro prolonga o tempo de permanência do material no interior da máquina. Esse maior tempo de passagem favorece a atuação dos sistemas de separação e limpeza, reduzindo a quantidade de grãos quebrados e de espigas mal processadas.

Já a combinação de maior velocidade com maior rotação ($7 \text{ km h}^{-1} - 750 \text{ rpm}$) mostrou-se segunda menor média de perdas e a segunda melhor estabilidade, mesmo apresentando um ponto fora de controle, acima do LSC, que caracteriza por elevada dispersão e instabilidade do processo. Nessa condição, o tempo reduzido de residência do material no sistema de trilha, associado à maior agressividade do cilindro, intensificou o desprendimento inadequado dos grãos e elevou as perdas. Esse resultado está em conformidade com os achados de Venegas et al. (2012), que reportaram que rotações elevadas do cilindro trilhador resultam em perdas expressivas de grãos, associadas ao aumento da quebra e ao excesso de impurezas no produto colhido. De forma complementar, Jukić et al. (2024) destacaram em sua revisão que a elevação da rotação do cilindro ou rotor é um dos principais fatores relacionados ao aumento da quebra de grãos de milho, confirmando que ajustes excessivamente agressivos comprometem tanto a eficiência da colheita quanto a qualidade do produto final.

A produtividade média entre os quatro tratamentos foi de 3.518 kg ha^{-1} , equivalente a $58,63 \text{ sacas ha}^{-1}$, valor inferior à média nacional de $100,6 \text{ sacas ha}^{-1}$ registrada pela CONAB (2021). Essa diferença reflete as condições ambientais e operacionais do experimento. É plausível que, em cenários de maior produtividade, o aumento do fluxo de material colhido sobrecarregue o sistema de trilha e separação, intensificando perdas caso não haja compensação nas regulagens da máquina. Assim, embora a combinação de 7 km h^{-1} e 550 rpm tenha se mostrado eficiente nas condições avaliadas, é provável que em talhões de alta produtividade sejam necessários ajustes adicionais para manter a estabilidade do processo e minimizar perdas.

As perdas foram a variável mais instável, com desvios associados principalmente à Máquina, uma vez que regulagens inadequadas de velocidade e rotação resultaram em pontos fora de controle. Além disso, fatores ligados à Matéria-prima (como altura de espiga e heterogeneidade na umidade dos grãos) e ao Meio ambiente também podem potencializar a ocorrência de perdas, ao influenciar tanto a alimentação da colhedora quanto a eficiência do sistema de trilha e separação. Esse comportamento está em consonância com Zerbato et al. (2013), que identificaram elevada variabilidade nas perdas em função de ajustes inadequados

da colhedora e da heterogeneidade da lavoura. De forma complementar, Zhang et al. (2020) desenvolveram e testaram um sistema inteligente de controle para colhedoras de milho, capaz de ajustar parâmetros operacionais em tempo real e reduzir perdas, evidenciando que o monitoramento contínuo das variáveis de colheita é fundamental para a estabilidade e a eficiência do processo.

7 CONCLUSÃO

As combinações de regulagens da velocidade de deslocamento e da rotação do cilindro de trilha afetam diretamente a qualidade do processo de colheita mecanizada do milho. Ajustes inadequados nessas variáveis podem intensificar a instabilidade operacional e elevar as perdas, enquanto regulagens equilibradas favorecem maior eficiência da operação.

O uso do Controle Estatístico de Processo possibilitou identificar a variabilidade das variáveis fisiológicas e morfológicas da cultura, bem como compreender sua influência sobre o desempenho da colhedora. Assim, a aplicação de cartas de controle mostrou-se uma ferramenta eficiente para a avaliação da qualidade operacional da colheita mecanizada do milho.

A combinação da velocidade de 4 km h⁻¹ com rotação de 550 rpm do cilindro proporcionou maior estabilidade do processo, enquanto a regulagem de 7 km h⁻¹ associada à mesma rotação apresentou maior instabilidade, porém a menor média de perdas, configurando-se como a condição mais eficiente para reduzir perdas e ampliar a capacidade operacional. Em contrapartida, as combinações de regulagens com rotação mais elevada (750 rpm) resultaram em instabilidade acentuada e tendência superior a perdas, reforçando a importância de regulagens adequadas da colhedora para manter a eficiência e a qualidade da operação.

Como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se avaliar um número maior de regulagens do sistema interno da colhedora, utilizar diferentes materiais genéticos e realizar experimentos em distintos anos agrícolas. Essas ampliações poderão validar os resultados em condições mais diversas, aumentando a robustez das conclusões e fornecendo subsídios ainda mais consistentes para o ajuste das regulagens da colhedora em diferentes cenários de produção.

8 REFERÊNCIAS

ANDRZEJEWSKI, J. H. et al. Influência do desfolhamento nos componentes de produção do milho. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 52334-52353, 2020.

ARCANJO, A. H. et al. Cultivares e características do grão de milho. **LUMEN ET VIRTUS**, v. 15, n. 43, p. 9131-9147, 2024.

BORIN, A. L. et al. Absorção, acúmulo e exportação de macronutrientes no milho doce cultivado em condições de campo. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, p. 1591-1597, 2010.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos 2021/2022**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/component/k2/item/download/39691_7cfce4cdbc69deafc9a9a0ca4d72d554d>. Acesso em: 27 nov. 2021.

CONAB. Safra de grãos está estimada em 332,9 milhões de toneladas influenciada por boa produção de soja, milho e arroz. **Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento**, 15 mai. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/assuntos/noticias/safra-de-graos-esta-estimada-em-332-9-milhoes-de-toneladas-influenciada-por-boa-producao-de-soja-milho-e-arroz>. Acesso em: 12 set. 2025.

CONAB. Último levantamento da safra 2023/2024 estima produção de grãos em 298,41 milhões de toneladas. **Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento**, 12 set. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/assuntos/noticias/ultimo-levantamento-da-safra-2023-2024-estima-producao-de-graos-em-298-41-milhoes-de-toneladas>. Acesso em: 12 set. 2025.

CRUZ, J. C. et al. **A cultura do milho**. [s.l.]: Embrapa, 2008. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/491689/1/A-cultura-do-milho.pdf>. Acesso em: 12 set. 2025.

DA SILVA, D. F. et al. Características morfológicas, melhoramento genético e densidade de plantio das culturas do sorgo e do milho: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 3, p. e12310313172-e12310313172, 2021.

FREITAS, A. R. et al. **Estatística experimental na agropecuária**. Embrapa, 2022.

FUNDAÇÃO CARGIL. **Desperdício de alimentos na colheita**. São Paulo, 28 fev. 2018. Disponível em: <https://fundacaocargill.org.br/desperdicio-alimentos-na-colheita>. Acesso em: 12 set. 2025.

GACHOKI, S.; MUTHONI, F.. Drivers of maize yield variability at household level in Northern Ghana and Malawi. **Geocarto International**, v. 38, n. 1, p. 2230948, 2023.
GALINDO, F. S. et al. Perdas ocorridas na colheita do milho em função do teor de água dos grãos na colheita. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia-MS, v. 6, n. 1, p.60-65, jan./mar. 2019.ISSN 2358-6303.

KASSA, M. G.; ASEMU, A. M.; HABTU, N. G. Impact of threshing moisture content, threshing methods, and storage structures on storability of maize grain. **Discover Food**, v. 5, n. 1, p. 107, 2025.

JUKIĆ, Ž. et al. Factors influencing maize kernel breakage—a review. **Journal of Central European Agriculture**, v. 25, n. 2, p. 401-415, 2024.

LENG, G; HALL, J. W. Predicting spatial and temporal variability in crop yields: an inter-comparison of machine learning, regression and process-based models. **Environmental research letters**; v. 15, n. 4, p. 044027, 2020.

LIU, H. et al. Genetic architecture of maize stalk diameter and rind penetrometer resistance in a recombinant inbred line population. **Genes**, v. 13, n. 4, p. 579, 2022.

LOUREIRO, D. R. et al. Perdas quantitativas na colheita mecanizada do milho cultivado em espaçamentos reduzido e convencional. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 2, p. 565-573, 2012.

MANTOVANI, E. C. et al. *Colheita e pós-colheita*. In: PEREIRA FILHO, I. A. (ed.). Cultivo do milho. 9. ed. Sete Lagoas: **Embrapa Milho e Sorgo**, 2015. (Sistemas de Produção, 1). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/748767/1/Milho-Colheita-e-pos-colheita.pdf>. Acesso em: 12 set. 2025.

MANTOVANI, E. C. **Perdas na colheita**. In: *Colheita e pós-colheita – milho*. Agência de Informação Tecnológica, Embrapa Milho e Sorgo, conteúdo migrado em 08 dez. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/producao/colheita-e-pos-colheita/perdas-na-colheita>. Acesso em: 12 set. 2025.

MASSEY FERGUSON. **Conheça a evolução das colheitadeiras no Brasil**. 2023. Disponível em: https://www.masseyferguson.com/pt_br/discover-mf/news/news/conheca-a-evolucao-das-colheitadeiras-no-brasil.html. Acesso em: 30 ago. 2025.

MCFADDEN, J.; NJUKI, E.; GRIFFIN, T. **Precision agriculture in the digital era: recent adoption on US farms**. 2023.

MESQUITA, C. M. et al. Avaliação das perdas de grãos na colheita mecanizada do milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 2, p. 190–194, 1998.

MIRANDA, R. A. et al. Sustentabilidade da cadeia produtiva do milho. Sete Lagoas: **Embrapa Milho e Sorgo**, 2021. Documento 261. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1132079/1/Doc-261.pdf>. Acesso em: 12 set. 2025.

LIMA, F. A. O. A eficiência da regulação na colheita do milho. **Revista FT**, 2025. Disponível em: <https://revistaft.com.br/a-eficiencia-da-regulagem-na-colheita-do-milho/>. Acesso em: 11 jun. 2025.

PEREIRA, I. A. **Cultivo do milho**. 9. ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2015. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/486917>. Acesso em: 12 set. 2025.

PINTO, D.A. et al. Características agronômicas de milho em função de diferentes espaçamentos entre linhas de semeadura. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, Guarapuava-PR, v.12, n.1, p.79-85, Jan-Abr., 2019. DOI: 10.5935/PAeT.V12.N1.08
PORTELA, J. A. **Perdas durante a colheita reduzem a lucratividade do produtor. Menos perdas, mais colheita**. **Cultivar Máquinas**, 2001.

REDIVO, G. D. et al. monitoramento de perdas em relação a velocidade de trabalho na colheita do milho 2ª safra. **TECH & CAMPO**, v. 1, n. 1, p. 3-16, 2018.

REIS, S. L. et al. Avaliação das perdas ocasionadas no processo de colheita de duas variedades de milho. **Pesquisas agrárias e ambientais**. Nova Xavantina, MT: Pantanal, 2023. 17 v., 2023.

RIBEIRO, J. L.; CATEN, S. T.; SCHWENGBER, C. Controle estatístico do processo: cartas de controle para variáveis, cartas de controle para atributos, função de perda quadrática, análise de sistemas de medição. Porto Alegre, **Fundação Empresa Escola de Engenharia da UFRGS**, 2012.

SILVA, R. P.; FRANCETTO, Tiago Rodrigo. **Manual de máquinas agrícolas: volume II**. Jaboticabal: Funep, 2025. xiv, 528 p. il.

SILVA, R. P.; VOLTARELLI, M. A.; CASSIA, M. T. **Controle de qualidade em operações agrícolas mecanizadas**. 1. ed. Jaboticabal: SBEA, 2015. 244 p. il.

SOARES, C. M.; ALVES, S. M. F. Controle estatístico aplicado ao processo de colheita mecanizada de milho. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 11, n. 2, p. 21–26, 2016.

TAMÁS, A. et al. Assessment of NDVI dynamics of maize (*Zea mays* L.) and its relation to grain yield in a polyfactorial experiment based on remote sensing. **Agriculture**, v. 13, n. 3, p. 689, 2023.

VENEGAS, F.; GASPARELLO, A. V.; DE ALMEIDA, M. P. Determinação de perdas na colheita mecanizada do milho (*Zea mays* L.) utilizando diferentes regulagens de rotação do cilindro trilhador da colheitadeira. **Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, v. 16, n. 5, 2012.

WANG, R; CHERKAUER, K; BOWLING, L. Corn response to climate stress detected with satellite-based NDVI time series. **Remote Sensing**, v. 8, n. 4, p. 269, 2016.

WORDELL FILHO, J. A. et al. **Pragas e doenças do milho: diagnose, danos e estratégias de manejo**. Florianópolis: Epagri, 2016.

ZERBATO, C. et al. Controle estatístico de processo aplicado à colheita mecanizada de milho. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 21, n. 3, p. 261, 2013.

ZHANG, Z. et al. Design and testing of an intelligent control system for maize picking harvest. **Applied Sciences**, v. 10, n. 24, p. 8888, 2020.