UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola

Desempenho Operacional Entre Colhedoras de Cana-de-Açúcar de Uma e Duas Linhas

MARCELO GALIASO

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2026

Desempenho Operacional Entre Colhedoras de Cana-de-Açúcar de Uma e Duas Linhas

MARCELO GALIASO
ENGENHEIRO MECÂNICO

Orientador: Prof. Dr. Roberto Carlos Orlando
Coorientador: Prof. Dr. Cristiano Márcio Alves de Souza

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Grande Dourados, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Mestre.

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

G156d Galiaso, Marcelo

Desempenho Operacional Entre Colhedoras de Cana-de-Açúcar de Uma e Duas Linhas [recurso eletrônico] / Marcelo Galiaso. -- 2026.

Arquivo em formato pdf.

Orientador: Roberto Carlos Orlando.

Coorientador: Cristiano Márcio Alves de Souza.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2026.

Disponível no Repositório Institucional da UFGD em: https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio

1. Colheita Mecanizada. 2. Custo Operacional. 3. Disponibilidade Mecânica. 4. Produtividade. 5. Telemetria. I. Orlando, Roberto Carlos. II. Souza, Cristiano Márcio Alves De. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal da Grande Dourados
Pró-Reitoria de Pós-Graduação
Coordenadoria de Pós-Graduação

ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA POR MARCELO GALIASO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO "ENGENHARIA AGRÍCOLA".

Aos vinte e três dias do mês de setembro do ano de dois mil e vinte e seis, às quatorze horas, em sessão pública, realizou-se na Universidade Federal da Grande Dourados, a Defesa de Dissertação de Mestrado intitulada **"Desempenho Operacional Entre Colhedoras de Cana-de-Açúcar de Uma e Duas Linhas"**, apresentada pela pessoa mestranda Marcelo Galiaso, do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, à Banca Examinadora constituída pelos membros: Prof. Dr. Roberto Carlos Orlando/UFGD (presidente/orientador), Prof.ª. Dr.ª Anamari Viegas de Araujo Motomiya/UFGD (membro titular interno), Prof. Dr. Gustavo Naves dos Reis/UFGD (membro titular externo), Prof. Dr. Salvio Napoleao Soares Arcoverde/UFGD (membro titular externo). Iniciados os trabalhos, a presidência deu a conhecer à pessoa candidata e aos integrantes da banca as normas a serem observadas na apresentação da Dissertação. Após a pessoa candidata ter apresentado a sua Dissertação, os membros da Banca Examinadora fizeram suas arguições. Terminada a Defesa, a Banca Examinadora, em sessão secreta, passou aos trabalhos de julgamento, tendo a pessoa candidata obtido APROVAÇÃO. Nada mais havendo a tratar, lavrou-se a presente ata, que vai assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Dourados/MS, 23 de setembro de 2026.

gov.br Documento assinado digitalmen
ROBERTO CARLOS ORLANDO
Data: 15/10/2026 12:33:21-0300
Verifique em https://validar.iti.g

Prof. Dr. Roberto Carlos Orlando
Presidente/orientador

gov.br Documento assinado digitalmente
ANAMARI VIEGAS DE ARAUJO MOTOMIYA
Data: 15/10/2026 15:52:53-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof.ª. Dr.ª Anamari Viegas de Araujo Motomiya
Membro Titular Interno

.br Documento assinado digitalmente
GUSTAVO NAVES DOS REIS
Data: 15/10/2026 12:46:50-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Gustavo Naves dos Reis
Membro Titular Externo

gov.br Documento assinado digitalmente
SALVIO NAPOLEAO SOARES ARCOVERDE
Data: 15/10/2026 14:23:55-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Salvio Napoleao Soares Arcoverde
Membro Titular Externo

(PARA USO EXCLUSIVO DA PROPG)

ATA HOMOLOGADA PELA PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO DA UFGD
PROPG/UFGD

DEDICATÓRIA

À minha família, especialmente à minha esposa, Elaine, e aos meus filhos, José Eduardo e Catarina, pela paciência, compreensão e apoio que tornaram possível a conclusão desta etapa.

AGRADECIMENTOS

À empresa na qual foram coletados os dados utilizados nesta pesquisa, pela disponibilização das informações e pela contribuição para a realização deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Roberto Carlos Orlando, pela orientação, pelos ensinamentos e pelas contribuições ao desenvolvimento desta dissertação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Às pessoas que me auxiliaram durante esta etapa da minha formação, pelo apoio, incentivo e colaboração ao longo desse percurso.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a conclusão deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

A colheita mecanizada é uma das etapas de maior impacto econômico na produção de cana-de-açúcar, pois influencia no custo final, na qualidade da matéria-prima entregue à indústria e na longevidade do canavial. O objetivo deste estudo foi comparar o desempenho das colhedoras John Deere CH570, de uma linha, e John Deere CH950, de duas linhas, operando em condições reais. A pesquisa foi conduzida no município de Angélica, Mato Grosso do Sul, entre junho e setembro de 2025, em áreas com espaçamento de plantio de 1,5 m e predominância de Latossolo Vermelho Distrófico. Os dados operacionais foram obtidos por telemetria, enquanto os indicadores de qualidade foram aferidos por procedimento padronizado em campo. A análise considerou a produção, as horas produtivas, a produtividade, o consumo de combustível, a disponibilidade mecânica, a eficiência operacional, as perdas, o pisoteio, o abalamento, o arranquio e o custo operacional. Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva e inferencial, com comparação entre os modelos avaliados. Os resultados indicaram que a CH950 apresentou maior capacidade produtiva e menor custo por tonelada colhida, sem aumento relevante do consumo específico de combustível. A CH570, por sua vez, apresentou maior disponibilidade mecânica, demonstrando melhor regularidade operacional no período avaliado. Quanto à qualidade da colheita, perdas, pisoteio e abalamento no cenário, os modelos apresentaram comportamento semelhante, enquanto o arranquio foi maior na CH950, indicando a necessidade de maior atenção às regulagens e à condução da máquina para preservação da soqueira. Conclui-se que a CH950 oferece maior capacidade de colheita e melhor desempenho econômico, enquanto a CH570 se destaca pela maior regularidade operacional, sendo o controle do arranquio o principal ponto de atenção na adoção da máquina de duas linhas.

Palavras-chave: Colheita Mecanizada; Custo Operacional; Disponibilidade Mecânica; Produtividade; Telemetria.

ABSTRACT

Mechanized harvesting is one of the stages with the greatest economic impact on sugarcane production, as it influences the final cost, the quality of the raw material delivered to the mill, and the longevity of the ratoon. The objective of this study was to compare the performance of the John Deere CH570 single-row harvester and the John Deere CH950 double-row harvester operating under real commercial conditions. The research was conducted in the municipality of Angélica, Mato Grosso do Sul, between June and September 2025, in areas with a row spacing of 1.5 m and a predominance of Dystrophic Red Latosol. Operational data were obtained through telemetry, while quality indicators were measured using a standardized field procedure. The analysis considered production, productive hours, productivity, fuel consumption, mechanical availability, operational efficiency, losses, trampling, tilting, uprooting, and operational cost. The data were subjected to descriptive and inferential statistical analysis, with comparison between the evaluated models. The results indicated that the CH950 showed greater productive capacity and lower cost per harvested tonne, without a relevant increase in specific fuel consumption. The CH570, in turn, showed greater mechanical availability, demonstrating better operational regularity during the evaluated period. Regarding harvest quality, losses, trampling, and tilting showed similar behavior between the models, while uprooting was higher in the CH950, indicating the need for greater attention to adjustments and machine operation to preserve the ratoon. It is concluded that the CH950 offers greater harvesting capacity and better economic performance, while the CH570 stands out for its greater operational regularity, with the control of uprooting being the main point of attention in the adoption of the double-row machine.

Keywords: Mechanical Availability; Mechanized Harvesting; Operational Cost; Productivity; Telemetry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa do Município de Angélica MS. 11
Figura 2 – Espaçamento de plantio. 11
Figura 3 – Colhedora de cana-de-açúcar CH570. 12
Figura 4 – Colhedora de cana-de-açúcar CH950. 13
Figura 5 – Dimensões CH950. 14
Figura 6 – Dimensões CH570. 14
Figura 7 – Sistema de Alimentação CH950. 15
Figura 8 – Fluxograma do processo. 19
Figura 9 – Gabarito de avaliação de qualidade. 20
Figura 10 – Itens avaliados no gabarito. 21
Figura 11 – Esquema de espaçamento e bitola e folga entre o rodado e a linha de cana. 25
Figura 12 – Tráfego controlado: colhedora, transbordo e plantadeira sobre as mesmas linhas de tráfego. 26
Figura 13 – Linha de tráfego demarcada no solo, alternando com a linha de plantio. 26
Figura 14 – Fluxograma do processo metodológico. 32
Figura 15 – Distribuição (histograma), box plot e Q-Q plot para Toneladas Colhidas: comparação CH570 vs CH950. 39
Figura 16 – Distribuição (histograma), box plot e Q-Q plot para Horas Trabalhadas: comparação CH570 vs CH950. 40
Figura 17 – Distribuição (histograma), box plot e Q-Q plot para Produtividade ($t\ h^{-1}$): comparação CH570 vs CH950. 41
Figura 18 – Distribuição (histograma), box plot e Q-Q plot para Velocidade ($km\ h^{-1}$): comparação CH570 vs CH950. 42
Figura 19 – Distribuição (histograma), box plot e Q-Q plot para Consumo específico ($L\ t^{-1}$): comparação CH570 vs CH950. 43
Figura 20 – Distribuição (histograma), box plot e Q-Q plot para Produtividade agrícola ($t\ ha^{-1}$): comparação CH570 vs CH950. 44
Figura 21 – Distribuição (histograma), box plot e Q-Q plot para Disponibilidade (%): comparação CH570 vs CH950. 45
Figura 22 – Distribuição (histograma), box plot e Q-Q plot para Eficiência operacional (%): comparação CH570 vs CH950. 46

Figura 23 – Distribuição (histograma), box plot e Q-Q plot para Perdas (%): comparação CH570 vs CH950. 48
Figura 24 – Distribuição (histograma), box plot e Q-Q plot para pisoteio (%): comparação CH570 vs CH950. 50
Figura 25 – Distribuição (histograma), box plot e Q-Q plot para Abalamento (%): comparação CH570 vs CH950. 51
Figura 26 – Distribuição (histograma), box plot e Q-Q plot para Arranquio (%): comparação CH570 vs CH950. 52
Figura 27 – Análise de custo operacional: custo por componente, custo total e investimento para mesma capacidade de colheita (CH570 vs CH950). 54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização síntese da área de estudo e do ambiente operacional. 10
Tabela 2 – Composição de amostra no período. 17
Tabela 3 – Volume Colhido. 17
Tabela 4 – Variáveis extraídas. 18
Tabela 5 – Indicadores Operacionais, definição e forma de cálculo. 22
Tabela 6 – Indicadores de Qualidade. 27
Tabela 7 – Premissas adotadas na análise de custo operacional. 35
Tabela 8A – Estatística descritiva, testes de pressupostos e comparação inferencial entre CH570 e CH950 (n = 16 por modelo). 37
Tabela 8B – Estatística descritiva, testes de pressupostos e comparação inferencial entre CH570 e CH950 (n = 16 por modelo). 38
Tabela 9 – Pisoteio (%) por equipamento e mês. 49
Tabela 10 – Custo operacional por tonelada estimado para os modelos CH570 e CH950. 53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparativo técnico de componentes e subsistemas. 15

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 3
2.1 Tecnologias de colhedoras de cana-de-açúcar 3
2.2 Desempenho Operacional de colhedoras 4
2.3 Perdas na Colheita Mecanizada 4
2.4 Qualidade da Colheita 5
2.5 Consumo de Combustível e Eficiência Energética 6
2.6 Logística e custos operacionais da colheita mecanizada 6
2.7 Confiabilidade e disponibilidade no desempenho operacional 7
2.8 Telemetria e Agricultura de Precisão aplicadas ao desempenho operacional 9
3. MATERIAL E MÉTODOS 10
3.1 Área de estudo 10
3.2 Máquinas avaliadas e critérios de caracterização técnica 12
3.3 Delineamento do estudo, período e unidade de análise 16
3.4 Base de dados, fontes e procedimentos de coleta 19
3.5 Indicadores e critérios de cálculo 21
3.6 Procedimentos estatísticos utilizados, justificativa e formulação 28
3.7 Tratamento dos dados e análise estatística 32
3.8 Análise de custo operacional 33
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 36
4.1 Delineamento amostral e critérios de comparação entre modelos 36
4.2 Indicadores de produção e eficiência operacional 39
4.3 Disponibilidade e eficiência operacional do equipamento 45
4.4 Indicadores de qualidade da colheita 47
4.5 Análise de custo operacional 53
4.6 Discussão integrada: produtividade, disponibilidade, qualidade da colheita e custos 55
5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS 57
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 58
7. APÊNDICE A - CÓDIGO PYTHON UTILIZADO NO PROCESSAMENTO E NA ANÁLISE DOS DADOS 63

1. INTRODUÇÃO

A cultura da cana-de-açúcar (Saccharum spp.) ocupa posição estratégica no agronegócio brasileiro, sustentando cadeias produtivas intensivas em logística, energia e transformação industrial. Nesse contexto, a colheita é reconhecida como uma das etapas mais críticas e onerosas do sistema de produção, com impacto direto nos custos operacionais, na qualidade da matéria-prima entregue à indústria e na produtividade das soqueiras nas safras subsequentes. A intensificação da mecanização, impulsionada por restrições à queima, aumento do custo da mão de obra e busca por eficiência, ampliou a necessidade de gestão técnica baseada em indicadores para garantir competitividade e estabilidade do processo de colheita em cana crua (GARCIA, 2009; MA et al., 2014; GREGO et al., 2014).

O desempenho operacional das colhedoras pode ser interpretado como a capacidade da operação em converter recursos (tempo, combustível, mão de obra e disponibilidade mecânica) em produção (toneladas e hectares colhidos), com qualidade e controle de perdas. Esse desempenho é influenciado por variáveis da máquina (velocidade de deslocamento, rotação do motor, regulagens dos sistemas de corte e limpeza), por condições de campo (produtividade do canavial, declividade, porte e acamamento da cana) e por fatores organizacionais (sincronismo com transbordo, planejamento de talhões, turnos e manutenção). Assim, indicadores como capacidade de campo, eficiência operacional, toneladas por hora produtiva, consumo específico de combustível (L t^{-1}), perdas visíveis e invisíveis, impurezas e danos à soqueira tornam-se essenciais para comparar tecnologias e orientar decisões de gestão (KAEWKABTHONG et al., 2019; LYRA et al., 2012; RAMOS et al., 2016a, 2016b).

Entre os desafios técnicos recorrentes da colheita mecanizada destacam-se: (i) perdas de matéria-prima, que reduzem o aproveitamento agrícola e elevam o custo por tonelada útil; (ii) preservação da qualidade da colheita, expressa pelo controle de impurezas minerais e vegetais e pela integridade dos colmos; (iii) redução de danos à soqueira, associados a arranquio e abalamento de perfilhos, com reflexos na longevidade do canavial; e (iv) controle do consumo de combustível, que representa parcela relevante do custo operacional.

O acompanhamento desses parâmetros em condições comerciais depende de dados confiáveis de operação. Nesse sentido, a telemetria embarcada e demais tecnologias de agricultura de precisão, como GNSS e monitoramento de produtividade, oferecem meios objetivos para registrar tempos, consumo e produção ao longo da safra, permitindo acompanhar a variabilidade do processo em condições reais de campo e apoiar decisões de gestão (ZAMYKAL; EVERINGHAM, 2009; CARASKI; MINGOTTE, 2015).

Sob a perspectiva econômica, a colheita mecanizada caracteriza-se por elevado investimento e custos operacionais significativos, o que torna a análise de custo por tonelada e por área um componente indispensável na avaliação de desempenho. A escolha entre diferentes configurações de colhedoras deve considerar não apenas a capacidade produtiva, mas também o custo por tonelada colhida, a depreciação do equipamento e o retorno sobre o investimento (BASTOS; LANDELL, 2016; RODRIGUES; ABI SAAB, 2007).

Nos últimos anos, o setor tem observado a expansão e o interesse por colhedoras de duas linhas, que, em tese, podem ampliar a capacidade de campo e reduzir o custo por tonelada por meio de maior taxa de colheita, sem necessariamente elevar proporcionalmente o tempo produtivo. Entretanto, a adoção dessa tecnologia envolve condicionantes operacionais (sistematização de plantio, logística de transbordo, padronização de regulagens e qualificação de operadores) e pode influenciar indicadores de qualidade e perdas. Os trabalhos que comparam diretamente as duas configurações ainda são poucos e avaliam conjuntos parciais de indicadores: Testa et al. (2016) compararam capacidade de campo e consumo de combustível, enquanto Silva e Folmann (2017) compararam rendimento, danos à soqueira e custo. A integração desses indicadores em um mesmo estudo, conduzido em operação comercial ao longo de uma safra, (produção, eficiência, consumo, disponibilidade mecânica, qualidade da colheita e custo por tonelada), permanece pouco explorada, e é essa lacuna que orienta o objetivo deste trabalho (MA et al., 2014).

Diante desse cenário, o objetivo deste trabalho foi comparar o desempenho operacional das colhedoras John Deere CH570 (uma linha) e CH950 (duas linhas) em ambiente de campo, por meio de indicadores de produção, eficiência e consumo de combustível, integrados a medidas de qualidade da colheita (perdas, pisoteio, arranquio e abalamento) e à análise de custos operacionais, com suporte de telemetria embarcada e de ferramentas de agricultura de precisão empregadas na aquisição e no monitoramento dos dados operacionais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tecnologias de colhedoras de cana-de-açúcar

As colhedoras de cana-de-açúcar são sistemas integrados de alta complexidade, concebidos para realizar, em uma única passada, o corte de pontas, o corte de base, a alimentação, a picagem dos colmos em rebolos, a limpeza primária e secundária e a transferência do material colhido para o transbordo. Essa integração faz com que o desempenho final dependa do conjunto (mecanismos + regulagens + condição do canavial), e não apenas da capacidade nominal da máquina. Nesse sentido, Ma et al. (2014) destacam que os principais subsistemas e parâmetros operacionais, (velocidade, rotação e regulagens de corte e de limpeza) condicionam diretamente produtividade, perdas e qualidade. Em revisão recente, Limna et al. (2025) compararam colhedoras de colmos inteiros e de colmos picados quanto à capacidade de processamento, ao consumo e à adequação às condições de campo, destacando a perda de eficiência em terrenos irregulares e o custo de aquisição como barreiras à adoção.

Do ponto de vista da configuração, as colhedoras são frequentemente classificadas pela capacidade de colheita em uma linha e duas linhas. Embora as máquinas de uma linha sejam mais difundidas no Brasil, o avanço das colhedoras de duas linhas decorre do potencial de ampliação da capacidade de campo; em contrapartida, a literatura aponta desafios práticos ligados à adaptação às condições de cultivo e à sistematização das lavouras, como a necessidade de compatibilizar o equipamento com diferentes espaçamentos entre linhas, alturas de corte e tipos de trator, além da exigência de regulagens adequadas do sistema de corte para preservar a qualidade da colheita (SILVA; FOLMANN, 2017; ZEIN EL-DEN et al., 2020).

Além disso, a qualidade do corte de base e a integridade da soqueira são temas recorrentes porque conectam diretamente tecnologia e manejo com longevidade do canavial. Essa relação está diretamente ligada à configuração da máquina: na colhedora de duas linhas, os discos de corte ficam posicionados à frente, junto aos divisores de linhas internos, em geral planos e copiadores do solo, de modo que apenas um disco entra em contato com cada soqueira, reduzindo o impacto sobre ela; já na colhedora de uma linha, os dois discos ficam posicionados no centro da linha, angulados e exercendo maior pressão sobre a soqueira (SILVA; FOLMANN, 2017). Quanto ao desempenho operacional, Silva e Folmann (2017) observaram que a colhedora de duas linhas alcançou maior rendimento mesmo operando em velocidade de deslocamento menor que a de uma linha, uma vez que a colheita simultânea de duas fileiras por passada compensou a redução de velocidade. Salvi (2006) discutiu a qualidade do corte de base

como elemento crítico de desempenho, e Rungmekarat et al. (2023) reforçaram a relação entre colheita mecanizada, perdas visíveis e danos à soqueira, mostrando que ajustes e condições operacionais podem amplificar efeitos indesejados.

2.2 Desempenho Operacional de colhedoras

A avaliação do desempenho operacional exige indicadores capazes de traduzir a operação em termos comparáveis e gerenciais. Entre os principais, destacam-se a capacidade de campo (ha h^{-1}), que pode ser teórica, efetiva ou operacional, e a eficiência operacional, definida como a razão entre o tempo efetivamente dedicado à colheita e o tempo total disponível. Kaewkabthong et al. (2019) e Mathanker et al. (2015) mostram que a capacidade de campo efetiva é fortemente influenciada por variáveis como velocidade e largura de corte, e que tecnologias de monitoramento, como o GNSS, ajudam a medir o desempenho real e os fatores que o reduzem.

A eficiência operacional é reduzida por tempos não produtivos, como manobras, deslocamentos, paradas para manutenção e esperas por transbordo. Essa leitura é essencial porque, em sistemas mecanizados, pequenas variações de tempo improdutivo acumulam impactos relevantes na capacidade diária de colheita e, por consequência, no custo operacional (LINHARES et al., 2012).

Por fim, variáveis de regulagem, especialmente a velocidade de deslocamento e a rotação do motor, são determinantes da produtividade da colhedora (t h^{-1}), do consumo específico de combustível (L t^{-1}) e da qualidade da colheita, expressa pelas perdas visíveis e pelos danos à soqueira. Martins et al. (2017) verificaram que o aumento da velocidade eleva o consumo por hora, mas pode reduzir o consumo por tonelada colhida, dependendo da condição do canavial e do comportamento das perdas, o que indica não haver ajuste universalmente ótimo.

2.3 Perdas na Colheita Mecanizada

As perdas de matéria-prima na colheita mecanizada de cana são um dos principais fatores que reduzem o aproveitamento agrícola e elevam o custo por tonelada útil. Em geral, são classificadas em perdas visíveis (porções de colmo, tocos, rebolos e fragmentos identificáveis no campo) e perdas invisíveis (caldo e pequenos fragmentos não recuperados),

cuja mensuração é mais desafiadora e exige metodologia apropriada (SEGATO et al., 2011; DA ROSA et al., 2009; NEVES et al., 2006).

Estudos recentes seguem quantificando perdas e discutindo estratégias de mitigação, evidenciando que o tema permanece central para a competitividade do sistema mecanizado: Carmo et al. (2021) compilaram resultados de diferentes trabalhos brasileiros; Testa et al. (2023) compararam o corte de base por impacto e o corte contínuo e verificaram menor taxa de danos aos tocos no sistema de corte contínuo, ainda que com maiores perdas visíveis nas áreas de maior produtividade; e Rungmekarat et al. (2023) relataram perdas visíveis de 3,4% a 4,0%, com danos aos tocos em 71% a 76% das soqueiras avaliadas. Nessa perspectiva, perdas devem ser analisadas conjuntamente com parâmetros de operação (velocidade/rotação/limpeza) e com a condição do canavial, pois tais variáveis alteram o comportamento do material no fluxo de colheita e no sistema de limpeza (CARMO et al., 2021).

2.4 Qualidade da Colheita

A qualidade da colheita mecanizada não se limita à quantidade colhida: ela inclui a qualidade da matéria-prima entregue, o nível de impurezas (minerais e vegetais), a integridade dos colmos e o grau de danos gerados na soqueira. A qualidade da cana como matéria-prima e, principalmente, a variabilidade dessa qualidade afetam o desempenho industrial e a eficiência do sistema como um todo (FIGUEIREDO et al., 2008).

Em nível de máquina/processo, a qualidade está fortemente associada ao corte de base e ao modo como a cana é alimentada e limpa ao longo do fluxo. Trabalhos dedicados à qualidade do corte de base e estudos de danos à soqueira mostram que ajustes inadequados, desgaste e condições de colheita podem aumentar irregularidades, perdas e impactos na rebrota (SALVI, 2006; RUNGMEKARAT et al., 2023; CASSIA et al., 2014).

Outro ponto sensível é o conflito de escolha entre limpeza × perdas: a regulagem do sistema de limpeza é necessária para reduzir impurezas, porém rotações excessivas dos extratores podem elevar perdas por ejeção. Tecnologias e discussões sobre limpeza a seco reforçam a busca por remover impurezas com menor penalidade em perdas, mas destacam que regulagem e condição operacional continuam sendo determinantes (SOARES et al., 2019; RAMOS et al., 2016b).

2.5 Consumo de Combustível e Eficiência Energética

O consumo de combustível representa parcela relevante do custo operacional, e por isso a eficiência energética é tratada como objetivo contínuo na gestão de frota. Além disso, o consumo é influenciado por características da máquina, condições do canavial e, principalmente, por parâmetros operacionais sob controle do gestor (faixas de rotação, velocidade e organização do trabalho) (MANHÃES et al., 2018).

Aspectos do cenário de operação também pesam: talhões mais longos tendem a reduzir tempos de manobra e, assim, melhorar o desempenho energético ao longo do turno. Além disso, a rotação do motor e a velocidade de deslocamento aparecem como variáveis de maior impacto, reforçando a necessidade de treinamento e padronização operacional para operar em faixas mais eficientes (RAMOS et al., 2016a; LYRA et al., 2012).

A relação entre velocidade e consumo deve ser lida com cuidado: há situações em que o consumo por hora aumenta, mas o consumo por tonelada ($L\ t^{-1}$) diminui, desde que a qualidade não se deteriore e as perdas não aumentem de forma proibitiva. Estudos comparando turnos e condições operacionais mostram, por exemplo, que desafios da operação noturna podem afetar velocidade, mas nem sempre se traduzem em aumento do consumo por tonelada (GIACHINI et al., 2016; MARTINS et al., 2017).

2.6 Logística e custos operacionais da colheita mecanizada

O desempenho operacional da colheita mecanizada é condicionado pelo funcionamento integrado da frente, envolvendo colhedora, transbordo, tráfego interno e transporte. Em condições comerciais, a eficiência operacional e a capacidade efetiva de colheita são fortemente influenciadas por tempos não produtivos associados a manobras, deslocamentos, interrupções operacionais e esperas decorrentes do fluxo de retirada da cana. Dessa forma, mesmo com bom desempenho técnico do equipamento, limitações logísticas podem reduzir o aproveitamento do tempo disponível e comprometer a estabilidade do processo ao longo do turno (LINHARES et al., 2012; MAGALHÃES; BALDO; CERRI, 2008).

Entre os elementos logísticos mais críticos, destaca-se o sincronismo colhedora–transbordo, que afeta diretamente a continuidade do corte e a regularidade do fluxo de material colhido. A disponibilidade de transbordos, o posicionamento durante a descarga, o tempo de acoplamento e o tráfego nas bordaduras e carreadores determinam a ocorrência de paradas e variações de ritmo, refletindo-se nos indicadores de eficiência e produtividade operacional.

Estudos voltados ao sincronismo e à organização do fluxo operacional apontam que melhorias relevantes podem ser obtidas por meio do planejamento de rotas, padronização de rotinas e redução de desperdícios de tempo no conjunto colheita–transbordo–transporte (MAGALHÃES; BALDO; CERRI, 2008; PANIAGO; MILAN, 2015).

Sob a perspectiva econômica, a colheita mecanizada é caracterizada por elevado investimento e custos operacionais significativos, o que torna indispensável relacionar desempenho operacional a custo por tonelada e custo por área. A análise econômica da mecanização apoia-se na estrutura clássica de custos de máquinas agrícolas, que distingue custos fixos, como a depreciação, de custos variáveis, como combustível e mão de obra, permitindo relacionar o investimento e a operação ao custo por unidade produzida (MIALHE, 1974). Avaliações técnico-econômicas mostram que a viabilidade do sistema depende não apenas da produtividade agrícola, mas também do nível de aproveitamento da frota, da regularidade da operação e da redução de improdutividades, uma vez que perdas de eficiência e paradas elevam o custo unitário mesmo sem alteração da produtividade do canavial. Assim, a gestão logística passa a ser um componente central para sustentar desempenho e reduzir custos operacionais em frentes mecanizadas (BRAUNBECK; OLIVEIRA, 2006; RODRIGUES; ABI SAAB, 2007; BASTOS; LANDELL, 2016).

Além dos fatores logísticos, o desempenho econômico do sistema também é fortemente condicionado pela capacidade de manter os equipamentos disponíveis e operando de forma contínua ao longo da safra. Paradas por falhas, intervenções corretivas e indisponibilidades elevam o tempo improdutivo, reduzem a capacidade efetiva de colheita e aumentam o custo unitário da operação. Assim, a discussão sobre logística e custos operacionais deve ser complementada pela análise de confiabilidade e disponibilidade, uma vez que a estabilidade do processo depende tanto do sincronismo do sistema quanto da manutenção do tempo produtivo da frota (BASTOS; LANDELL, 2016; DO NASCIMENTO et al., 2020).

2.7 Confiabilidade e disponibilidade no desempenho operacional

Em operações comerciais, a disponibilidade, especialmente a mecânica, é um dos fatores que mais condiciona a capacidade efetiva de colheita. Paradas corretivas, atrasos de manutenção e falhas recorrentes reduzem a produção diária possível e elevam custos, mesmo quando há boa produtividade agrícola e operadores treinados. Por isso, indicadores de disponibilidade e abordagens de engenharia de confiabilidade são úteis para interpretar

desempenho operacional como resultado também do estado do equipamento e da gestão de manutenção (BASTOS; LANDELL, 2016; DO NASCIMENTO et al., 2020).

Além de medir quanto se colhe, é necessário compreender as causas que reduzem o tempo produtivo, como padrões de falha, frequência de interrupções e tempo necessário para retorno à operação. Estudos com enfoque em confiabilidade aplicada a colhedoras mostram que análises sistemáticas de falhas e intervenções podem apoiar ações para elevar tempo produtivo e estabilidade operacional da frota, contribuindo para reduzir variabilidade do processo ao longo da safra (DO NASCIMENTO et al., 2020).

No contexto do desempenho operacional, a disponibilidade mecânica deve ser analisada em conjunto com a eficiência operacional, pois paradas para manutenção e interrupções durante a jornada reduzem o tempo efetivamente convertido em colheita e se refletem diretamente nos indicadores de produtividade. Linhares et al. (2012) mostram que tempos não produtivos associados a paradas e esperas operacionais impactam a eficiência, o que é relevante para interpretar diferenças de desempenho observadas em condições reais de campo.

Do ponto de vista econômico, a confiabilidade e a disponibilidade têm efeito direto na viabilidade do corte mecanizado, pois improdutividades elevam o custo unitário ao reduzir a produção entregue por unidade de tempo disponível. Cada hora de indisponibilidade representa não apenas perda de produção, mas também a continuidade dos custos fixos, como depreciação e mão de obra, que incidem independentemente de o equipamento estar operando, o que evidencia a importância de quantificar o custo associado à disponibilidade de cada configuração. Nesse sentido, análises de custo no corte mecanizado indicam que a produtividade agrícola e a disponibilidade mecânica aparecem como fatores-chave para a viabilidade econômica do sistema, reforçando a importância de incluir disponibilidade na avaliação comparativa de desempenho operacional (BASTOS; LANDELL, 2016).

Por fim, em estudos comparativos entre tecnologias e configurações de colhedoras, a disponibilidade e a confiabilidade ajudam a separar o efeito da capacidade nominal do equipamento do efeito do sistema de manutenção e do planejamento operacional. Como o desempenho é influenciado também por fatores organizacionais, incluindo turnos e manutenção, análises que incorporam disponibilidade oferecem uma leitura mais consistente da performance em ambiente comercial, especialmente quando a decisão envolve comparar alternativas tecnológicas sob restrições reais de operação (MA et al., 2014).

2.8 Telemetria e Agricultura de Precisão aplicadas ao desempenho operacional

A Agricultura de Precisão contribui para a avaliação do desempenho operacional ao permitir interpretar a variabilidade espacial do ambiente produtivo e sua relação com o comportamento das operações mecanizadas. Corá et al. (2004) e Grego et al. (2014) mostram que a variabilidade de atributos do solo pode ser mapeada e utilizada como suporte para decisões de manejo, fornecendo base para compreender diferenças de desempenho associadas a condições heterogêneas de campo.

Do ponto de vista gerencial, Zamykal e Everingham (2009) destacam que quantificar a variabilidade é um passo necessário, porém insuficiente sem integração com as decisões operacionais, argumentando que a telemetria e os dados digitais ampliam a rastreabilidade e favorecem o controle do processo ao longo do tempo, em vez de avaliações pontuais. De forma complementar, Caraski e Mingotte (2015) apontam que a adoção de tecnologias de Agricultura de Precisão na cultura da cana-de-açúcar permite monitorar e ajustar as operações mecanizadas, contribuindo para ganhos de eficiência e melhor uso dos recursos (ZAMYKAL; EVERINGHAM, 2009; CARASKI; MINGOTTE, 2015).

No nível operacional, tecnologias como GNSS e monitoramento de produtividade permitem mensurar parâmetros de desempenho em campo com maior objetividade, como capacidade de trabalho e padrões de deslocamento, além de apoiar comparações entre condições de operação. Estudos relatam o uso de GNSS na determinação de capacidade de campo e discutem a avaliação de tecnologias de monitoramento de produtividade como suporte à gestão, enquanto aplicações de automação na colheita mecanizada têm sido apresentadas como ferramentas para controle operacional e apoio à redução de custos (KAEWKABTHONG et al., 2019; JENSEN et al., 2010; LANÇONI et al., 2020).

Neste trabalho, as tecnologias de agricultura de precisão foram empregadas na aquisição e no monitoramento dos dados operacionais — especialmente a telemetria embarcada —, e não como objeto de investigação.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido em ambiente comercial de colheita mecanizada de cana-de-açúcar no município de Angélica (Tabela 1), estado de Mato Grosso do Sul (MS), Brasil. Para fins de identificação territorial, Angélica possui código IBGE 5000856 e área territorial de 1.283,629 km². Informações municipais reportam, como referência da sede, altitude de 358 m, latitude 22º09'12" S e longitude 53º46'16" O, que são adotadas neste trabalho como referência geográfica do município.

Tabela 1. Caracterização síntese da área de estudo e do ambiente operacional.

Item	Descrição
Município/UF	Angélica – MS (Brasil)
Código IBGE	5000856
Área territorial	1.283,629 km²
Coordenadas aproximadas da sede	Lat. −22,16; Long. −53,77 (geoftp.ibge.gov.br)
Declividade predominante	0–3%, com pontos até 6% (informação de campo)
Solo predominante	Latossolo Vermelho Distrófico (SiBCS) (Embrapa)
Espaçamento de plantio	1,5 m

Fonte: IBGE (2022), Santos et al. (2018) e dados de campo.

Quanto ao relevo operacional observado no estudo, as áreas colhidas apresentaram declividade predominante entre 0 e 3%, com pontos localizados atingindo até 6%, condição relevante por influenciar estabilidade, tração e regularidade da colheita, especialmente na comparação de desempenho em ambiente real de produção.

O solo predominante na região de Angélica–MS é Latossolo Vermelho Distrófico, classificação do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (SANTOS et al., 2018). Essa caracterização é importante porque solos desse grupo, tipicamente profundos e bem drenados, condicionam o tráfego e a resposta operacional do conjunto mecanizado (máquina–solo), influenciando tanto o ritmo de trabalho quanto variáveis associadas à colheita em cana crua. A Figura 1 apresenta a localização municipal utilizando a base cartográfica oficial do IBGE.

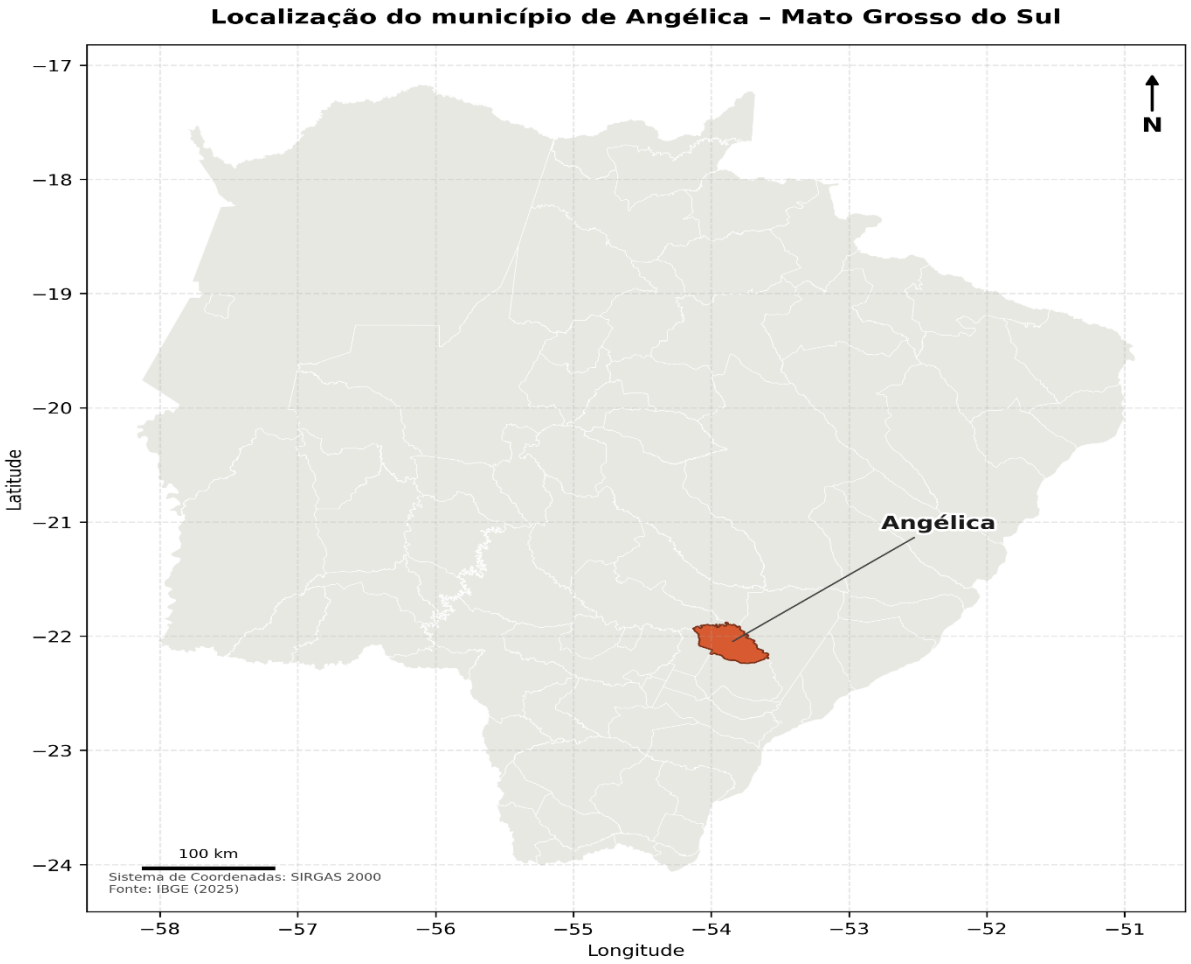


Figura 1. Mapa do Município de Angélica MS.

O sistema de plantio adotado nas áreas avaliadas é de espaçamento simples de 1,5 m (Figura 2), com presença de múltiplas variedades comerciais (ex.: CTC 9001, RB97 5033, IAC SP 550, RB 5242, CTC 9006, entre outras) e talhões em diferentes idades de corte (predominantemente 2º, 3º e 4º cortes). Essas informações são registradas para contextualizar a heterogeneidade agronômica do ambiente comercial no qual os modelos foram comparados.

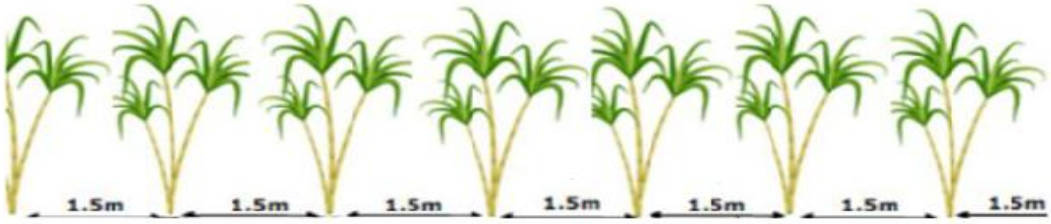


Figura 2. Espaçamento de plantio.

Para caracterização do cenário produtivo do período avaliado, a produção colhida foi coletada diretamente na empresa, a partir dos registros operacionais das frentes de colheita, e a produtividade agrícola (t ha^{-1}) foi registrada na base operacional exportada do sistema de telemetria Solinftec®.

3.2 Máquinas avaliadas e critérios de caracterização técnica

As máquinas avaliadas neste estudo representam duas arquiteturas de colheita mecanizada de cana-de-açúcar: John Deere CH570 (uma linha) e John Deere CH950 (duas linhas). A comparação entre os modelos foi realizada em ambiente comercial e as diferenças estruturais podem influenciar os indicadores operacionais (produtividade, consumo, eficiência operacional/disponibilidade e qualidade). As Figuras 3 e 4 ilustram, respectivamente, os modelos CH570 e CH950 avaliados neste estudo.



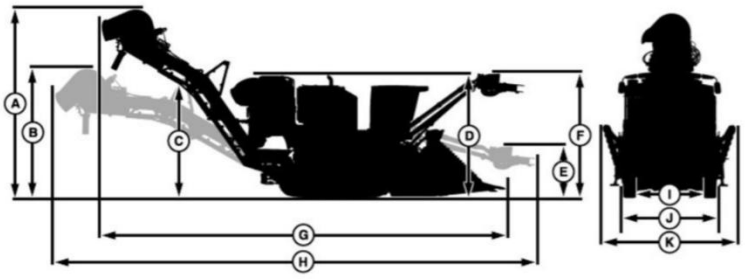
Figura 3. Colhedora de cana-de-açúcar CH570.



Figura 4. Colhedora de cana-de-açúcar CH950.

A caracterização inicial considera o porte físico (dimensões e massa), pois essas variáveis afetam requisitos de logística e manobra, acesso a talhões, estabilidade em terrenos com variação de declividade e até condições práticas de manutenção (acessibilidade a componentes, tempo de intervenção e organização de frentes). A Figura 5 apresenta as dimensões do modelo CH950, incluindo duas configurações de eixo e a massa aproximada indicada no material técnico do fabricante. A Figura 6 apresenta a mesma família de informações para o modelo CH570, também com dimensões e massa aproximada. Esses dados ajudam a justificar, no método, por que máquinas de duas linhas tipicamente operam com maior massa e envelope dimensional, implicando diferenças operacionais quando se interpretam tempos de parada, disponibilidade e eficiência de colheita.

Referência	Eixo 3,10 m (10.17 ft)		Eixo 3,35 m (10.99 ft)	
	m	ft	m	ft
A	7.04	23.09	7.04	23.09
B	4.20	14.78	4.20	14.78
C	3.90	12.79	3.90	12.79
D	4.30	14.10	4.30	14.10
E	1.62	5.31	1.62	5.31
F	4.77	15.85	4.77	15.85
G	15.54	50.98	15.54	50.98
H	17.26	56.62	17.26	56.62
I	2.33	7.64	2.45	8.00
J	3.17	10.4	3.58	11.74
K	4.57	14.99	4.54	14.89

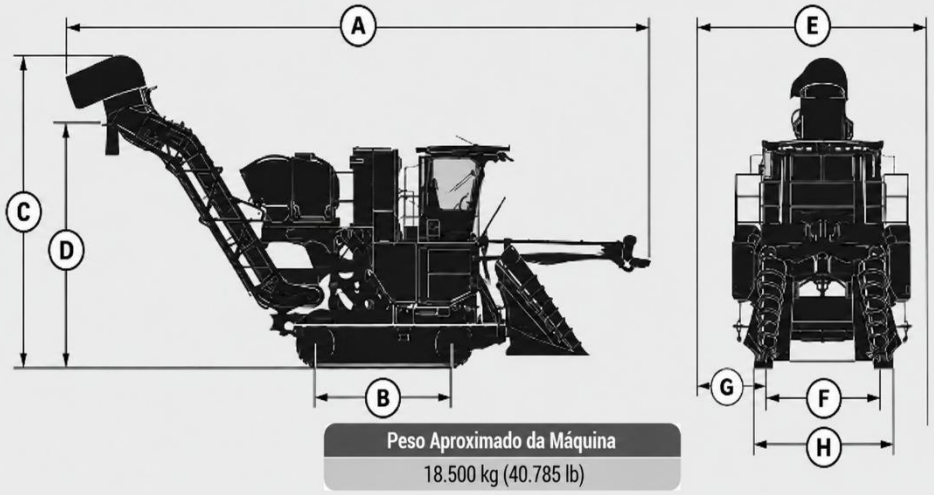


Peso Aproximado da Máquina

35.545 kg (78.363 lb)

Figura 5. Dimensões CH950.

Referência	CH570
	m
A	15,14
B	2,97
C	6,23
D	4,87
E	6,45
F	1,88
G	4,39
H	2,33



Peso Aproximado da Máquina

18.500 kg (40.785 lb)

Figura 6. Dimensões CH570.

Além das dimensões, o critério central de caracterização técnica está na arquitetura funcional: a colhedora de duas linhas integra, em um único equipamento, conjuntos duplicados (ou ampliados) de alimentação e corte em relação à colhedora de uma linha. Na prática, isso altera a capacidade potencial de fluxo de material e a demanda de potência/hidráulica do sistema, afetando indicadores como $t\ h^{-1}$ e $L\ t^{-1}$, e pode alterar o comportamento de perdas conforme a regulagem do sistema de limpeza e o regime de alimentação. Para garantir uma comparação metodologicamente defensável, essa diferença é tratada como característica do sistema, e será considerada na análise por meio de controle do contexto produtivo (produtividade agrícola) e padronização das regras de cálculo dos indicadores operacionais.

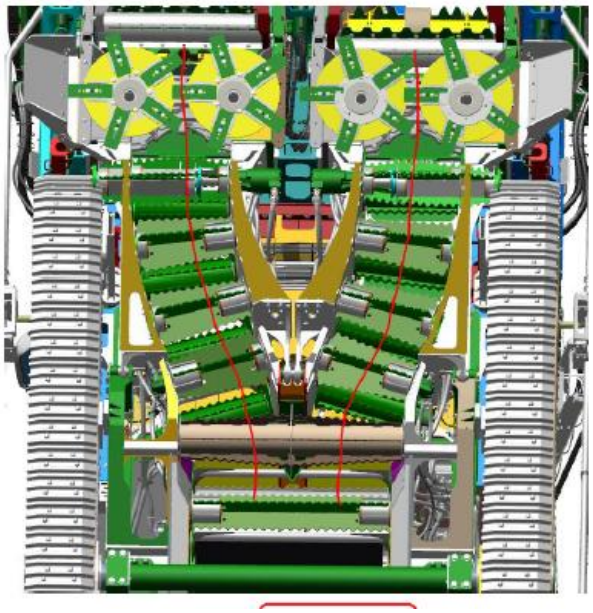


Figura 7. Sistema de Alimentação CH950.

Um terceiro critério de caracterização adotado neste estudo é a complexidade do sistema e sua implicação na manutenção, descrita a partir da quantidade e distribuição de componentes em subsistemas críticos. O Quadro 1 apresenta um comparativo técnico entre colhedoras de uma linha e duas linhas, evidenciando diferenças em itens como divisores e rolos alimentadores, sapatas flutuantes, conjunto de corte de base, facas dos discos, rolamentos, bombas, mangueiras, motores hidráulicos e elementos do sistema de rodante. Essa caracterização é relevante porque o aumento do número de componentes e pontos funcionais tende a elevar a necessidade de inspeções, ajustes e intervenções, o que pode influenciar o comportamento de paradas operacionais e, consequentemente, indicadores como disponibilidade mecânica e eficiência operacional.

Quadro 1. Comparativo técnico de componentes e subsistemas.

Item	**1 linha**	**2 linhas**
Divisores e rolos	2 divisores, 4 rolos	3 divisores, 6 rolos
Sapatas Flutuantes	2	4
Caixa do corte de base	1	2
Facas dos discos	10	20
Rolamento dos rolos alimentadores	9	21
Bombas	8	10
Mangueiras	260	350

Roletes de esteira	16	14
Motores Char-Lynn	26	42
Corrente de esteira	2	2
Extratores de palha	2	2
Esteira	2	2
Motor/Cabine	1	1

Fonte: Adaptado de Massirer (2023b, p. 6).

Por fim, a caracterização técnica aqui descrita orienta a interpretação dos resultados ao explicitar que as diferenças entre CH570 e CH950 não se limitam ao número de linhas colhidas, mas abrangem porte físico, arquitetura funcional e complexidade de subsistemas, conforme indicado no Quadro 1. Dessa forma, a comparação de desempenho operacional será conduzida com indicadores calculados de forma padronizada para ambos os modelos e com consideração das condições de colheita registradas no período avaliado, reduzindo o risco de atribuir ao modelo efeitos que estejam associados ao contexto operacional e agronômico.

3.3 Delineamento do estudo, período e unidade de análise

Este estudo possui delineamento observacional comparativo, em ambiente comercial, com base em dados reais de operação, visando comparar o desempenho operacional das colhedoras CH570 (uma linha) e CH950 (duas linhas). A comparação é conduzida por meio de indicadores de produção, eficiência e consumo, integrados a medidas de controle do processo relacionadas a perdas e qualidade, com suporte de telemetria embarcada e de ferramentas de agricultura de precisão empregadas na aquisição e no monitoramento dos dados operacionais.

A base operacional foi obtida a partir da telemetria Solinftec®, por meio de exportações em planilhas e relatórios, permitindo selecionar períodos específicos e consolidar informações por equipamento. Adicionalmente, a produtividade agrícola do ambiente de colheita, expressa em t ha^{-1}, foi obtida a partir da mesma base exportada, mantendo coerência entre o cenário agronômico observado e os indicadores operacionais comparados.

A unidade de análise considerada é o equipamento (colhedora), com consolidações realizadas por equipamento e por mês, além do consolidado do período total, de modo a permitir comparação entre modelos sob variação operacional típica de ambiente comercial de longo prazo. A estrutura analítica adota, portanto, a unidade equipamento–mês para análises mensais e agregações no nível do período para síntese global.

Para a comparação entre os modelos, foi adotada amostra balanceada, composta por quatro equipamentos do modelo CH570 e quatro equipamentos do modelo CH950, totalizando oito colhedoras avaliadas. A Tabela 2 apresenta a composição da amostra no período, mantendo a rastreabilidade por equipamento e por janela temporal analisada. Como a operação ocorre em regime contínuo e envolve múltiplas frentes, a identificação detalhada de todos os talhões e áreas colhidas não é apresentada individualmente no texto, preservando-se a rastreabilidade por meio da base exportada.

Tabela 2. Composição de amostra no período.

Modelo	Equipamento (n)	Unidade analítica	Volume no Período (t)
CH570	04	Equipamento-mês (consolidado do período)	266.534,40
CH950	04	Equipamento-mês (consolidado do período)	535.711,70
Total	08	-	802.246,10

O período analisado compreendeu de 01/06/2025 a 30/09/2025, conforme base amostrada. No intervalo, foram colhidas 802.246,10 t de cana-de-açúcar, sendo 535.711,70 t atribuídas ao modelo CH950 e 266.534,40 t ao modelo CH570, compondo uma base robusta para análise comparativa em escala operacional. A Tabela 3 apresenta o volume colhido por modelo e sua participação no total.

Tabela 3. Volume Colhido.

Período	01/06/2025–30/09/2025		
Item	**CH570**	**CH950**	**Total**
Toneladas colhidas (t)	266.534,40	535.711,70	802.246,10
Participação no total (%)	33,22%	66,78%	100%

Por fim, as variáveis operacionais extraídas da telemetria foram padronizadas em unidades e definições para permitir comparação direta entre modelos, contemplando volume produzido, tempos (produção e paradas), consumo de combustível e indicadores derivados (t h^{-1}, L h^{-1}, L t^{-1}, eficiência operacional e disponibilidade mecânica). A Tabela 4 apresenta a relação completa das variáveis extraídas, com suas descrições e unidades.

Tabela 4. Variáveis extraídas.

Variável	Descrição	Unidade
Toneladas	Massa total de cana colhida pelo equipamento	t
Horas produtivas	Tempo em que a máquina esteve efetivamente colhendo	h
Horas perdidas	Tempo em que a máquina esteve parada por motivos diversos	h
Horas manutenção	Tempo em que a máquina esteve em manutenção corretiva ou preventiva	h
Não Gerenciáveis	Tempo de parada por fatores externos (clima, logística)	h
Indeterminado	Tempo de parada com causa não identificada	h
Total de horas	Soma de todas as horas (produtivas e paradas)	h
Tonelada / Horas Produtivas	Capacidade de colheita efetiva	$t\ h^{-1}$
Total de diesel abastecido	Volume de diesel consumido	L
RPM médio produtivo	Rotação média do motor durante a operação de colheita	RPM
RPM médio em manobra	Rotação do motor durante as manobras de cabeceira	RPM
Dias trabalhados	Número de dias em que o equipamento operou	dias
Toneladas hora	Capacidade operacional	$t\ h^{-1}$
Litros hora	Consumo de combustível por hora	$L\ h^{-1}$
Litros Tonelada	Consumo específico de combustível	$L\ t^{-1}$
Produtividade agrícola	Tonelada de cana por hectare	$t\ ha^{-1}$
Remonta de óleo hidráulico	Volume de óleo hidráulico reposto	L
Remonta litros hora	Taxa de reposição de óleo hidráulico por hora	$L\ h^{-1}$
Remonta litros tonelada	Taxa de reposição de óleo hidráulico por tonelada	$L\ t^{-1}$
Eficiência operacional	Percentual do tempo em que a máquina esteve produtiva	%
Disponibilidade Mecânica	Disponibilidade mecânica do equipamento	%

3.4 Base de dados, fontes e procedimentos de coleta

A base de dados deste estudo foi composta por dois conjuntos complementares: (i) registros operacionais obtidos por telemetria da Solinftec®, e (ii) avaliações de qualidade executadas em campo. A Figura 8 apresenta o fluxograma do processo de coleta, tratamento e análise dos dados adotado neste estudo.

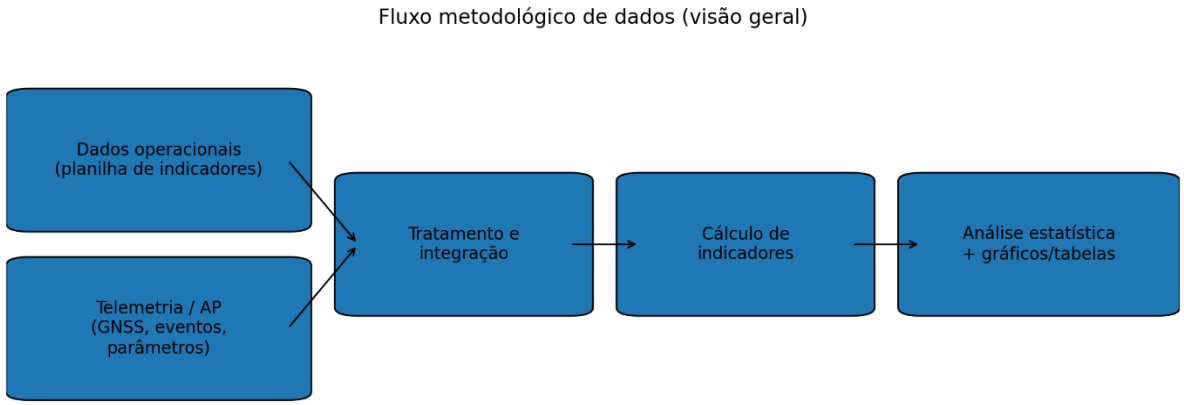


Figura 8. Fluxograma do processo.

A partir das exportações da telemetria, os dados foram organizados em planilhas para permitir o tratamento e a padronização por equipamento e por período, viabilizando comparações diretas entre os modelos avaliados. Nessa etapa, os registros foram estruturados para derivar e consolidar indicadores de desempenho operacional compatíveis com o objetivo do estudo (por exemplo, produção acumulada, produtividade operacional, consumo e disponibilidade), mantendo rastreabilidade por equipamento e por janela temporal analisada.

Em paralelo, a avaliação de qualidade da colheita foi obtida por meio de procedimento interno padronizado, executado em condições reais de operação nas frentes, com registro do turno e do talhão associado a cada colhedora avaliada. Nesse procedimento, a qualidade é aferida por parâmetros de pisoteio, perdas, arranquio e abalamento. Além disso, o documento estabelece uma recomendação diária de amostragem em cenário favorável (10 gabaritos para perdas e pisoteio, 5 avaliações para arranquio e abalamento, e 10 pontos para infestação final).

As medições seguem critérios operacionais definidos. A avaliação de pisoteio é realizada nos três turnos de colheita, com demarcação em campo e mensuração do trecho pisoteado dentro do gabarito estabelecido. Já as avaliações de arranquio e abalamento são realizadas apenas no turno A e utilizam contagens antes e após a passagem da colhedora, com

cálculo padronizado para quantificação percentual. A avaliação de perdas adota gabarito retangular, com procedimentos de limpeza da área, separação, classificação e pesagem das perdas, registrando-as por classes, assegurando consistência entre as coletas. As classes de perdas consideradas no procedimento compreendem a cana inteira, correspondente ao colmo inteiro deixado no campo sem ser recolhido pela colhedora; o toco, parte basal do colmo que permanece presa à soqueira ou solta no campo após o corte; o tolete, fração de colmo cortada em rebolos que não foi recolhida; a cana ponta, porção apical do colmo perdida durante a operação; o estilhaço, constituído por fragmentos pequenos de colmo resultantes do processamento da colhedora; e o pedaço, que reúne as porções intermediárias de colmo não classificadas nas demais categorias. A Figura 9 apresenta o gabarito utilizado na avaliação de qualidade e a Figura 10 ilustra os itens avaliados no gabarito.

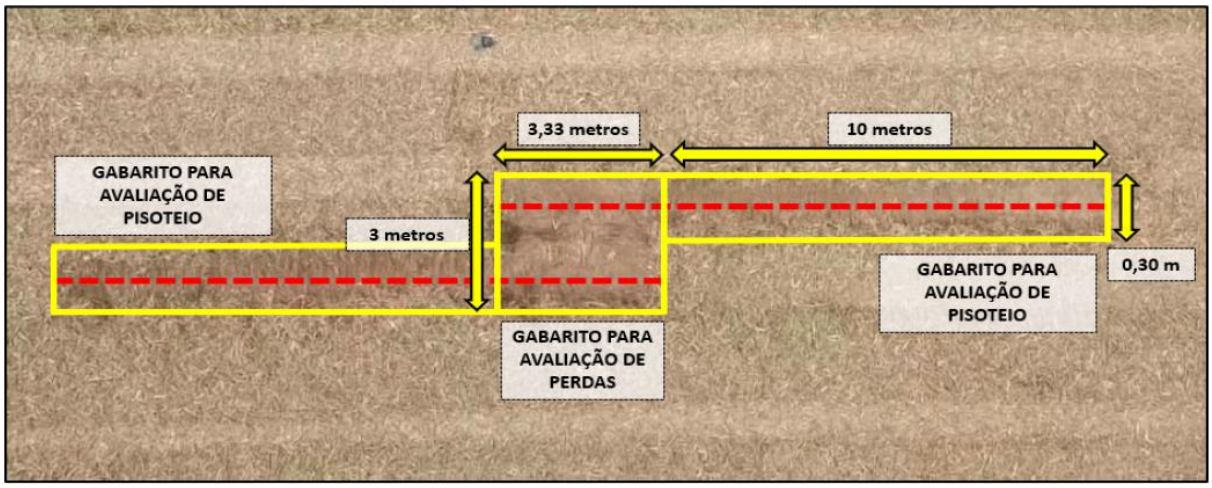


Figura 9. Gabarito de avaliação de qualidade.

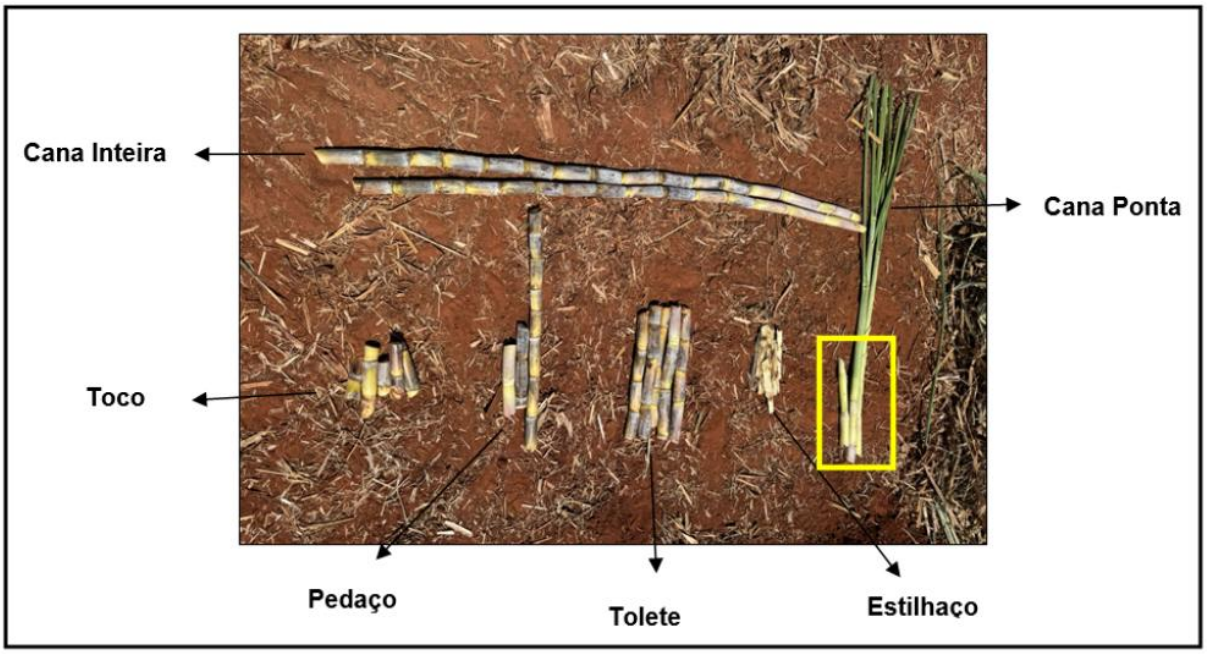


Figura 10. Itens avaliados no gabarito.

Por fim, para análise integrada, os dados de telemetria e as avaliações de qualidade foram tratados como camadas complementares do mesmo processo: a telemetria descreve o comportamento operacional em escala contínua, enquanto as avaliações de qualidade qualificam o resultado da colheita em pontos amostrais. A consolidação foi conduzida de forma a sustentar a comparação entre modelos em ambiente comercial, sem necessidade de listar individualmente todas as áreas e frentes observadas, dado o volume de talhões e o regime contínuo de operação em três turnos.

3.5 Indicadores e critérios de cálculo

A partir das exportações dos dados de telemetria, os registros foram consolidados por equipamento e por mês, e para o período total, de modo a permitir comparação entre os modelos em uma mesma janela temporal e sob variabilidade típica de operação comercial.

Para reduzir vieses de comparação, os indicadores derivados foram calculados, sempre que possível, a partir de totais consolidados (por exemplo, soma de toneladas, soma de horas produtivas, soma de litros), evitando médias simples de razões quando há diferentes volumes de produção entre equipamentos e meses. Assim, no nível mensal e no consolidado do período, os principais indicadores foram obtidos por relações diretas entre grandezas acumuladas.

A análise contemplou dois conjuntos de indicadores, definidos de modo a capturar tanto a eficiência da operação quanto a qualidade do resultado entregue. O primeiro conjunto,

de natureza operacional, reúne as toneladas colhidas, as horas trabalhadas, a produtividade operacional, o consumo de combustível, a velocidade de deslocamento, a eficiência operacional (EO) e a disponibilidade mecânica (DM). Esses indicadores traduzem a capacidade da máquina de converter tempo, combustível e disponibilidade em produção, permitindo comparar o rendimento dos modelos em escala comercial. O segundo conjunto, voltado à qualidade da colheita, abrange o pisoteio, as perdas, o arranquio, o abalamento e o índice de infestação final, parâmetros que expressam o impacto da operação sobre a matéria-prima e sobre a soqueira, com reflexos diretos na longevidade do canavial e no aproveitamento agrícola. A análise conjunta dos dois grupos é o que permite avaliar não apenas qual modelo colhe mais, mas a que custo operacional e com qual preservação da lavoura, evitando que ganhos de produtividade sejam interpretados isoladamente. A Tabela 5 consolida os indicadores adotados no estudo, com seus respectivos símbolos, definições, formas de cálculo e unidades.

Tabela 5. Indicadores Operacionais, definição e forma de cálculo.

Indicador	**Símbolo**	**Definição**	**Unidade**
Toneladas colhidas	P	Soma das toneladas de cana-de-açúcar colhidas no período considerado	t
Horas trabalhadas	HP	Soma das horas em que a colhedora esteve efetivamente em operação de colheita (tempo efetivo produtivo)	h
Produtividade Operacional	TPH	Quantidade de cana-de-açúcar colhida por hora efetiva de trabalho	$t\ h^{-1}$
Consumo de combustível	D	Soma dos litros de diesel consumidos no período	L
Consumo específico	CE	Quantidade de diesel consumida para colher uma tonelada de cana	$L\ t^{-1}$
Produtividade agrícola	PA	Valor registrado na base do estudo para caracterização do ambiente (tonelada de cana por hectare)	$t\ ha^{-1}$
Velocidade de colheita	V	Velocidade média da colhedora durante a operação de colheita	$km\ h^{-1}$
Disponibilidade Mecânica	DM	Percentual do tempo em que a máquina esteve mecanicamente apta a operar	%

Eficiência operacional	EO	Percentual do tempo em que a máquina esteve efetivamente operando em relação ao tempo disponível	%
Perdas totais na colheita	Perdas	Percentual de todas as formas de perdas de matéria-prima durante o processo de colheita mecanizada	%
Danos por pisoteio	Pisoteio	Percentual de danos causados às soqueiras pelo tráfego da máquina	%
Danos por abalamento	Abalamento	Percentual de danos causados às soqueiras por abalo lateral durante a colheita	%
Danos por arranquio	Arranquio	Percentual de soqueiras arrancadas durante a operação de colheita	%

Entre os indicadores operacionais, quatro são obtidos por cálculo específico. A produtividade operacional, que traduz o ritmo de colheita, resulta da divisão das toneladas colhidas pelas horas efetivamente trabalhadas (Equação 1).

- $$TPH = \frac{P}{HP} \quad (1)$$

Onde:

TPH = produtividade operacional (t h^{-1});

P = toneladas colhidas no período (t);

HP = horas trabalhadas em operação de colheita (h).

Já o consumo específico relaciona o gasto de diesel à produção, indicando quantos litros são necessários para colher cada tonelada (Equação 2).

- $$CE = \frac{D}{P} \quad (2)$$

Onde:

CE = consumo específico (L t^{-1});

D = consumo total de combustível no período (L);

P = toneladas colhidas no período (t).

O aproveitamento do tempo é descrito por dois indicadores complementares. A disponibilidade mecânica mede a proporção do tempo programado em que a máquina permaneceu em condição de operar, considerando as paradas atribuídas à manutenção mecânica e desconsiderando paradas operacionais, climáticas, logísticas ou administrativas (Equação 3).

- $$DM\ (\%) = \frac{Tp - Tm}{Tp}\ x\ 100 \quad (3)$$

Onde:

DM = disponibilidade mecânica (%);

Tp = tempo programado para operação (h);

Tm = tempo destinado à manutenção mecânica (h).

A eficiência operacional expressa quanto do tempo em que a máquina esteve disponível foi efetivamente aproveitado na colheita. Esse indicador permite verificar se a disponibilidade mecânica foi convertida em trabalho produtivo, diferenciando o tempo em que a colhedora estava apta a operar daquele realmente dedicado ao corte da cana. Dessa forma, são desconsideradas interrupções operacionais não relacionadas à manutenção, como manobras, refeições, esperas por transbordo e outras paradas ocorridas durante a operação (Equação 4).

- $$EO\ (\%) = \frac{Tempo\ Total\ Disponível - Horas\ Perdidas}{Tempo\ Total\ Disponível}\ x\ 100 \quad (4)$$

Onde:

EO = eficiência operacional (%);

Tempo Total Disponível = tempo disponível do equipamento, após o desconto da manutenção mecânica (h);

Horas Perdidas = tempo de parada por motivos diversos, como manobras, refeições e espera por transbordo (h).

Na avaliação da qualidade da colheita, quatro indicadores são quantificados por cálculo direto a partir das medições de campo. O pisoteio, que reflete o tráfego da máquina sobre a soqueira, é dado pela proporção entre a extensão pisoteada e a extensão total avaliada no gabarito (Equação 5).

- $$Pisoteio\ (\%) = \frac{metros\ pisoteados}{metros\ avaliados}\ x\ 100 \quad (5)$$

Onde:

Metros pisoteados = extensão do canteiro pisoteado (m);

Metros avaliados = extensão total avaliada no gabarito (m).

O pisoteio corresponde à fração da linha de cana submetida ao tráfego das máquinas durante a colheita. Em espaçamento simples de 1,5 m, os rodados da colhedora e do transbordo trafegam pelas entrelinhas, de modo que a largura do rodado e a bitola do conjunto determinam a folga disponível em relação à soqueira. Reis (2023) apresenta o esquema de espaçamento e

bitola adotado para estreitar a linha de tráfego, no qual a folga entre o rodado e a linha de cana passa de 0,35 m para 0,45 m (Figura 11).

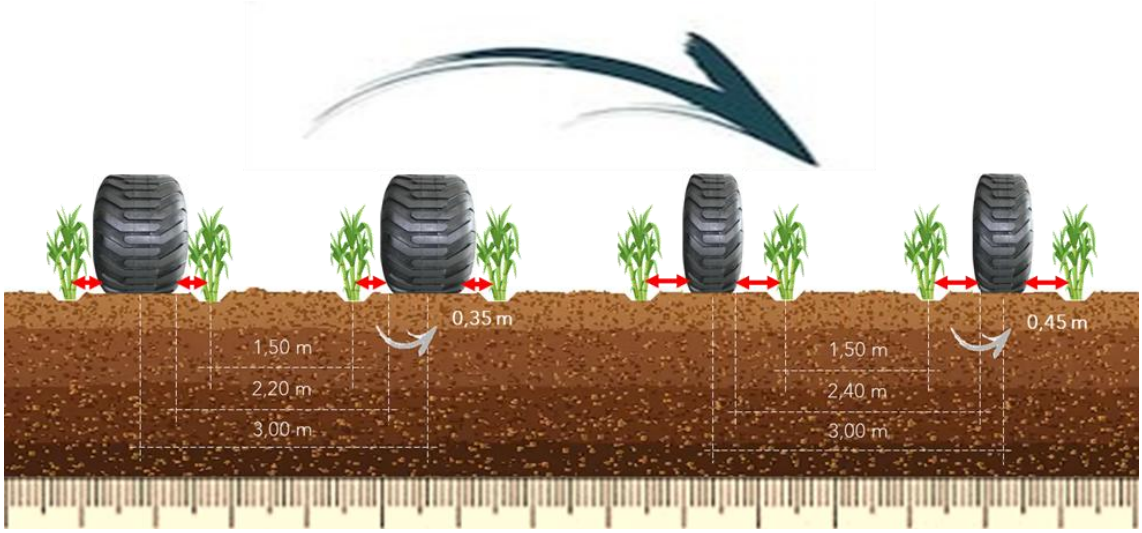


Figura 11. Esquema de espaçamento e bitola e folga entre o rodado e a linha de cana.

Na operação avaliada, o tráfego é orientado pelas linhas definidas no plantio: a colheita é conduzida com piloto automático (GPS), mantendo a colhedora alinhada às linhas de plantio e repetindo as mesmas linhas de tráfego a cada passada. Esse controle reduz a variabilidade do pisoteio entre operadores e turnos e é o que recomenda o material técnico da colhedora, que orienta iniciar a colheita pelas linhas gêmeas e operar sempre com piloto automático para evitar o pisoteio e a perda de alinhamento (MASSIRER, 2023a). A Figura 12 ilustra esse arranjo, em que colhedora, transbordo e plantadeira trafegam sobre as mesmas faixas entre as linhas de cana, e a Figura 13 mostra a linha de tráfego demarcada no solo, alternando com a linha de plantio.

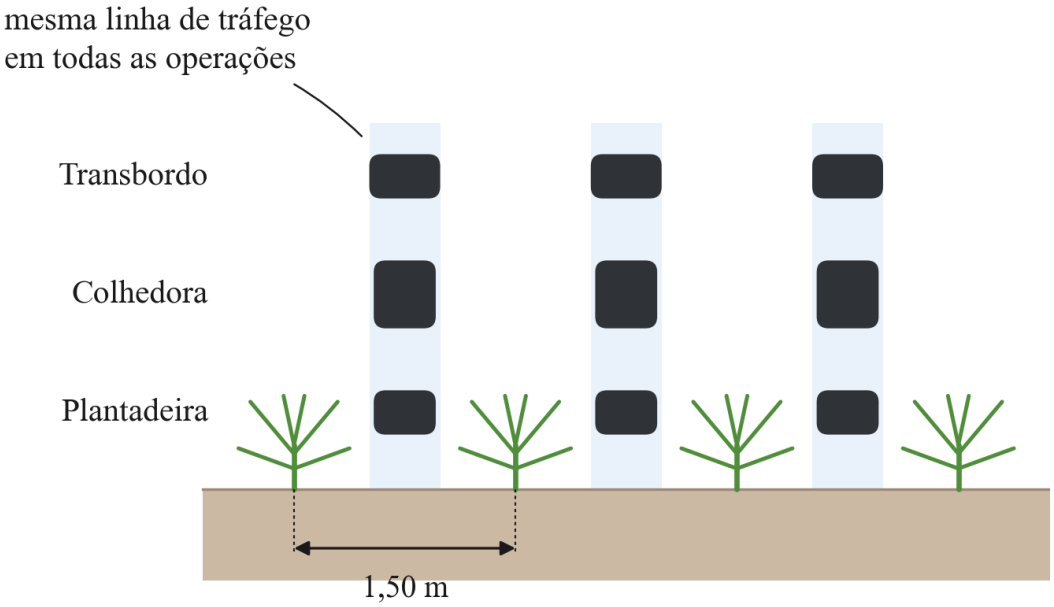


Figura 12. Tráfego controlado: colhedora, transbordo e plantadeira sobre as mesmas linhas de tráfego.



Figura 13. Linha de tráfego demarcada no solo, alternando com a linha de plantio.

A medição é feita em campo, sobre a linha de cana, com demarcação de um trecho de 10 m e mensuração da extensão efetivamente pisoteada pelo rodado (Figura 9), expressa pela razão entre metros pisoteados e metros avaliados (Equação 5). As avaliações seguem o mesmo padrão amostral das demais avaliações de qualidade, nos três turnos de colheita, mantendo a mesma referência de medição para os dois modelos.

As perdas, por sua vez, resultam da média entre o total registrado e o número de avaliações realizadas, reunindo todas as classes coletadas no gabarito (Equação 6).

- $$Média\ de\ perdas = \frac{Total\ de\ perdas}{Total\ de\ Avaliações} \quad (6)$$

Onde:

Total de perdas = somatório de todas as classes de perdas registradas;

Total de avaliações = número de avaliações realizadas.

Os danos à soqueira são descritos por dois indicadores, ambos calculados em relação ao estande presente antes da colheita — ou seja, a população total de colmos existente na área antes da passagem da colhedora. O arranquio corresponde à fração de perfilhos arrancados durante a passagem da máquina (Equação 7).

- $$Arranquio\ (\%) = \frac{Total\ de\ perfilhos\ arrancados}{estande\ antes\ da\ colheita}\ x\ 100 \quad (7)$$

Onde:

Perfilhos arrancados = número de colmos arrancados durante a passagem da colhedora;

Estande antes da colheita = população total de colmos presente na área antes da passagem da colhedora.

De forma semelhante, o abalamento expressa a fração de perfilhos que perderam firmeza das raízes após a passagem da máquina (Equação 8).

- $$Abalamento\ (\%) = \frac{Total\ de\ perfilhos\ abalados}{estande\ antes\ da\ colheita}\ x\ 100 \quad (8)$$

Onde:

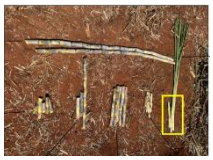
Perfilhos abalados = colmos que, após a passagem da colhedora, não apresentam firmeza das raízes ao solo;

Estande antes da colheita = população total de colmos presente na área antes da passagem da colhedora.

A Tabela 6 apresenta a síntese dos indicadores de qualidade, com a forma de obtenção em campo e a respectiva ilustração.

Tabela 6. Indicadores de Qualidade.

Indicador de Qualidade	**Como é obtido no campo**	**Ilustração**
Pisoteio	Medição em metros das áreas pisoteadas no trecho avaliado	

Perdas visíveis	Coleta, separação, classificação e pesagem no gabarito	
Arranquio	Contagem dos perfilhos em relação ao estande, antes e após a passagem da colhedora	
Abalamento	Verificação manual da firmeza dos perfilhos após a colheita	

Fonte: Documento interno (Avaliação de Qualidade na Colheita), versão 07, 2025.

3.6 Procedimentos estatísticos utilizados, justificativa e formulação

A comparação entre os modelos CH570 (n = 16) e CH950 (n = 16) foi conduzida considerando como unidade amostral cada combinação máquina × mês (quatro máquinas por modelo avaliadas ao longo de quatro meses, totalizando dezesseis observações por modelo). A estratégia analítica foi definida para comparar o desempenho operacional por amostras independentes, reconhecendo que há repetição por máquina ao longo do tempo, o que pode introduzir dependência entre equipamentos. Assim, a inferência estatística foi complementada por inspeção gráfica e por medidas de tamanho de efeito, reduzindo a dependência exclusiva do p-valor.

Inicialmente, para cada uma das doze variáveis analisadas, foram calculadas medidas descritivas por modelo: média, desvio-padrão amostral, mediana e intervalos (mínimo–máximo), além do intervalo de confiança de 95% para a média. A média amostral foi obtida conforme a Equação 9.

- $$\overline{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i \qquad (9)$$

Onde:

$\overline{x}$ = média amostral;

n = número de observações;

x_i= valor da i-ésima observação.

O desvio-padrão amostral, que expressa a dispersão dos dados em torno da média, foi calculado conforme a Equação 10.

- $$s = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{(x_i - \overline{x})^2}{n-1}} \quad (10)$$

Onde:

s = desvio-padrão amostral;

x_i= valor da i-ésima observação;

$\overline{x}$ = média amostral;

n = número de observações.

O intervalo de confiança de 95% para a média foi determinado conforme a Equação 11.

- $$\overline{x} \pm t_{\left(1-\frac{\alpha}{2}, n-1\right)} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}, com\ \alpha = 0{,}05 \quad (11)$$

Onde:

IC95% = intervalo de confiança de 95% para a média;

$\overline{x}$ = média amostral;

t = valor crítico da distribuição t de Student para n−1 graus de liberdade;

s = desvio-padrão amostral;

n = número de observações;

α = nível de significância (0,05).

Essas métricas oferecem leitura direta do nível e da variabilidade operacional, servindo de base para a interpretação aplicada à gestão e ao planejamento de colheita. Para cada variável foram geradas figuras diagnósticas contendo histogramas (forma e assimetria), boxplots (mediana, dispersão e possíveis valores extremos) e gráficos quantil-quantil (Q-Q plots) por modelo, para avaliação visual da aderência à normalidade. Esses gráficos são importantes porque, com amostras moderadas, a decisão sobre normalidade e a presença de valores extremos influenciam diretamente a escolha do teste inferencial.

A verificação da normalidade foi realizada pelo teste de Shapiro–Wilk, cuja hipótese nula assume que a amostra provém de uma distribuição normal (SHAPIRO; WILK, 1965). Quando as duas amostras apresentaram comportamento aproximadamente normal, avaliou-se a homogeneidade de variâncias para definir a versão apropriada do teste t. Para isso, utilizou-se o teste de Levene, baseado na análise de variância dos desvios absolutos em relação ao centro do grupo, conforme a Equação 12 (LEVENE, 1960).

- $$W = \frac{(N-k)\sum_{i=1}^{k} n_i \left(\overline{Z_{i.}} - \overline{Z_{..}}\right)^2}{(k-1)\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{n_i} \left(Z_{ij} - \overline{Z_{i.}}\right)^2} \quad (12)$$

Onde:

W = estatística do teste de Levene;

Z_{ij}= desvio absoluto de cada observação em relação ao centro do grupo, dado por $|X_{ij} - \overline{X_i}|$;

k = número de grupos (neste estudo, 2);

N = número total de observações;

n_i = número de observações no grupo i;

Z_i= média dos desvios do grupo i;

$Z..$ = média geral dos desvios;

$\overline{X_i}$ = média ou mediana do grupo i.

Em todos os testes de hipótese adotou-se nível de significância de 5% (α = 0,05), de modo que valores de p inferiores a 0,05 indicam diferença estatisticamente significativa entre os modelos, levando à rejeição da hipótese nula de igualdade. Quando a normalidade foi considerada aceitável, a comparação foi feita por teste t bicaudal ($H_0: \mu_1 = \mu_2$; $H_a: \mu_1 \neq \mu_2$). Para variâncias iguais, utilizou-se o teste t de Student, conforme a Equação 13 (STUDENT, 1908).

- $$t = \frac{\overline{x_1} - \overline{x_2}}{S_p\sqrt{\frac{1}{n_1}+\frac{1}{n_2}}} \; ; \; s_p^2 = \frac{(n_1-1)s_1^2+(n_2-1)s_2^2}{n_1+n_2-2} \tag{13}$$

Onde:

t = estatística do teste t de Student;

$\overline{x_1}, \overline{x_2}$ = médias dos grupos 1 e 2;

S_p = desvio-padrão combinado (pooled);

s_1^2, s_2^2 = variâncias dos grupos 1 e 2;

n_1, n_2 = números de observações dos grupos 1 e 2.

Para variâncias diferentes, adotou-se o teste t de Welch, que ajusta os graus de liberdade pela aproximação de Welch–Satterthwaite, conforme a Equação 14 (WELCH, 1947).

- $$t = \frac{\overline{x_1} - \overline{x_2}}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1}+\frac{s_2^2}{n_2}}} \tag{14}$$

Onde:

t = estatística do teste t de Welch;

$\overline{x_1}, \overline{x_2}$ = médias dos grupos 1 e 2;

s_1^2, s_2^2 = variâncias dos grupos 1 e 2;

n_1, n_2 = números de observações dos grupos 1 e 2.

Quando a normalidade não foi atendida em pelo menos um dos modelos, ou quando a distribuição apresentou assimetria ou valores extremos relevantes, utilizou-se o teste U de Mann–Whitney (bicaudal), adequado para comparar a tendência central por meio de postos, conforme a Equação 15 (MANN; WHITNEY, 1947).

- $$U_1 = n_1 n_2 + \frac{n_1 (n_1+1)}{2} - R_1 \; ; \; U_2 = n_1 n_2 - U_1 \tag{15}$$

Onde:

$U_1 U_2$ = estatísticas do teste de Mann–Whitney para os grupos 1 e 2;

n_1, n_2 = números de observações dos grupos 1 e 2;

R_1 = soma dos postos do grupo 1 na amostra combinada.

Além da significância estatística, calculou-se o tamanho de efeito para quantificar a relevância prática da diferença entre os modelos. O modelo "d" de Cohen foi obtido conforme a Equação 16 (COHEN, 1988).

- $$d = \frac{\overline{x_1} - \overline{x_2}}{s_p} \tag{16}$$

Onde:

d = tamanho de efeito (d de Cohen);

$\overline{x_1}, \overline{x_2}$ = médias dos grupos 1 e 2;

S_p = desvio-padrão combinado (pooled);

A interpretação seguiu referências clássicas, considerando efeito pequeno em torno de 0,2, moderado em torno de 0,5 e grande em torno de 0,8, com extensões usuais para valores superiores (COHEN, 1988). Adicionalmente, reportou-se a diferença percentual entre os modelos, conforme a Equação 17.

- $$\Delta(\%) = \frac{\overline{x_{CH950}} - \overline{x_{CH570}}}{\overline{x_{CH570}}} \; x \; 100 \tag{17}$$

Onde:

$\Delta(\%)$ = diferença percentual entre os modelos;

$\overline{x_{CH950}}$ = média do modelo CH950;

$\overline{x_{CH570}}$ = média do modelo CH570.

Essas métricas facilitam a leitura gerencial, especialmente quando amostras moderadas podem gerar p-valores sensíveis à variabilidade e às suposições do modelo.

Os procedimentos foram executados em linguagem Python, versão 3.13, com o uso de bibliotecas consolidadas na literatura científica: NumPy 2.4.1, para operações numéricas (HARRIS et al., 2020); SciPy 1.17.0, para os testes estatísticos (VIRTANEN et al., 2020);

Matplotlib 3.10.8 (HUNTER, 2007) e seaborn 0.13.2 (WASKOM, 2021), para a geração e a estilização das figuras.

3.7 Tratamento dos dados e análise estatística

Antes da análise estatística, os dados exportados da telemetria e das avaliações de campo passaram por uma etapa de tratamento e preparação, conduzida em ambiente Python, com o objetivo de assegurar consistência, padronização e confiabilidade das informações. A Figura 14 apresenta o fluxograma do processo desenvolvido, desde a coleta até a obtenção dos resultados.

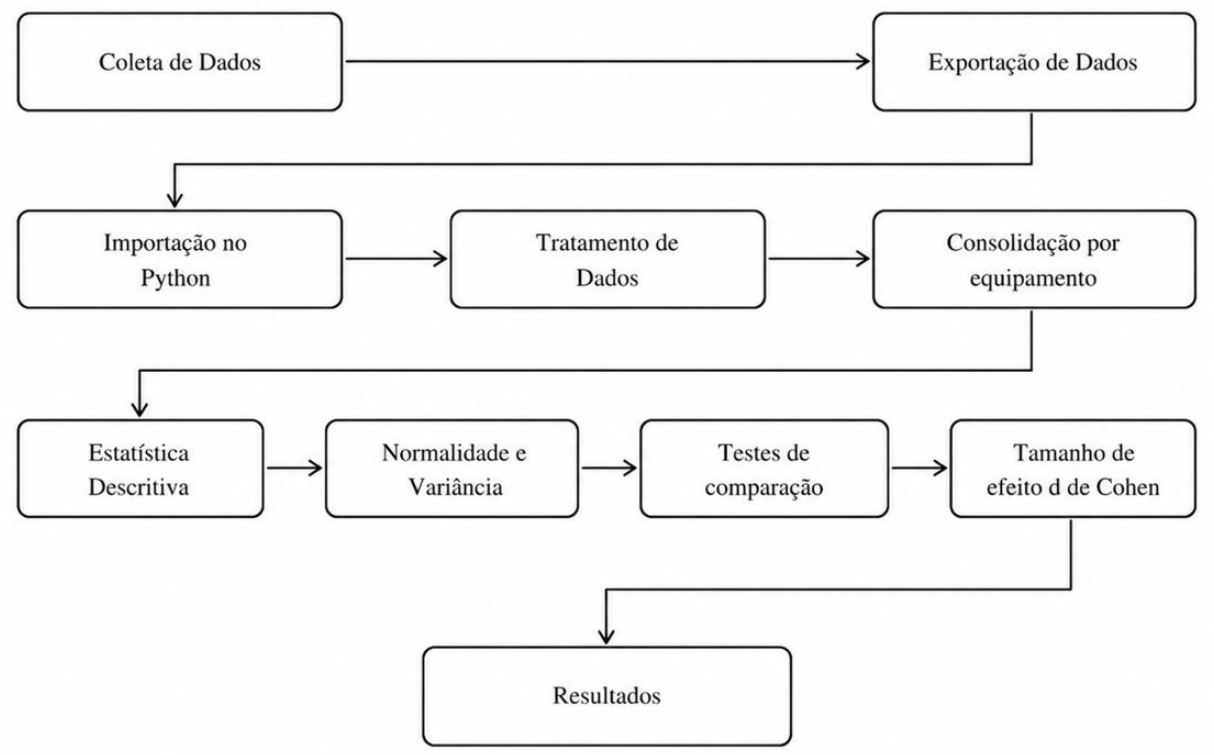


Figura 14. Fluxograma do processo metodológico.

A etapa de tratamento consistiu na importação da base, padronização de nomes de colunas e unidades, conversão de tipos numéricos e verificação de consistência (ex.: remoção/ajuste de registros inviáveis como valores negativos ou nulos para variáveis físicas). Valores ausentes foram tratados como missing (NaN) e, para cada métrica, as análises consideraram apenas observações válidas daquela variável. A consolidação dos indicadores foi

realizada por equipamento e por mês, preservando a variabilidade operacional observada em campo.

A base foi organizada em dois níveis. O primeiro, a base granular, reúne os registros originais por período, preservados para auditoria e visualização. O segundo, a base analítica consolidada, deriva da primeira e foi utilizada nas comparações entre os modelos; nela, cada linha reúne um equipamento em um determinado mês, identificado por modelo, com os indicadores de desempenho calculados sob a mesma lógica de agregação e nas mesmas unidades. Essa organização segue boas práticas de amostragem e análise estatística, evitando interpretações equivocadas sobre o número de observações e sobre a independência dos dados.

Concluído o tratamento, a base analítica consolidada foi submetida à estatística descritiva, incluindo coeficiente de variação e quartis, e aos testes de comparação descritos no item 3.6.

3.8 Análise de custo operacional

Além do desempenho operacional, avaliou-se o custo operacional de cada modelo, com o objetivo de relacionar a produtividade observada ao custo por tonelada colhida e, assim, subsidiar a decisão entre as configurações de uma e duas linhas. A análise baseou-se na estrutura clássica de custos de máquinas agrícolas, que distingue custos fixos e variáveis (MIALHE, 1974), considerando os componentes diretos mais relevantes para a comparação entre os modelos: combustível e mão de obra, de natureza variável, e depreciação, de natureza fixa. Trata-se de uma análise determinística, baseada em premissas de mercado e nos dados de produção e consumo levantados no período, não constituindo, portanto, um teste estatístico.

O custo com combustível por tonelada foi obtido pela multiplicação do consumo específico de cada modelo pelo preço do diesel, conforme a Equação 18.

- $$C_{comb} = CE \; x \; P_{diesel} \tag{18}$$

Onde:

C_{comb} = custo de combustível por tonelada (R$/t);

CE = consumo específico (L t^{-1});

P_{diesel} = preço do diesel (R$/L).

Adotou-se o preço médio do óleo diesel no Mato Grosso do Sul em junho de 2025, de R$ 6,46 por litro, conforme levantamento da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2025).

O custo com mão de obra por turno foi estimado a partir de um salário-base mensal de referência para operador de colhedora, acrescido de encargos, provisões e benefícios operacionais. Sobre o salário-base mensal aplicou-se um fator multiplicador para incorporar encargos e provisões trabalhistas, como FGTS, INSS patronal, décimo terceiro salário, férias e adicional de um terço, obtendo-se o custo mensal carregado. Esse valor foi convertido em custo por turno a partir da jornada mensal, expressa em turnos equivalentes de oito horas, e acrescido de uma parcela referente a benefícios e custos operacionais por turno, como alimentação e transporte, conforme a Equação 19.

- $$C_{turno} = \frac{S\ x\ f}{T_{mês}} + B \quad (19)$$

Onde:

C_{turno} = custo de mão de obra por turno (R$);

S = salário-base mensal (R$);

f = fator de encargos e provisões;

$T_{mês}$ = número de turnos equivalentes no mês;

B = benefícios e custos operacionais por turno (R$).

O custo de mão de obra por tonelada foi então obtido pela razão entre o custo total de mão de obra no período, considerando os três turnos diários de operação, e a produção colhida, conforme a Equação 20.

- $$C_{mo} = \frac{C_{turno}\ x\ N_{turnos}}{P} \quad (20)$$

Onde:

C_{mo} = custo de mão de obra por tonelada (R$/t);

C_{turno} = custo de mão de obra por turno (R$);

N_{turnos} = número total de turnos no período;

P = produção colhida no período (t).

O custo de depreciação por tonelada foi obtido pela razão entre a depreciação do equipamento no período e a produção colhida, adotando-se o método de depreciação linear, conforme a Equação 21.

- $$C_{dep} = \frac{V_{aquisição}\ x\ (1 - V_{residual})}{VU\ x\ TPH} \quad (21)$$

Onde:

C_{dep} = custo de depreciação por tonelada (R$/t);

$V_{aquisição}$ = valor de aquisição do equipamento (R$);

VU = vida útil do equipamento (h);

$V_{residual}$ = valor residual, expresso como fração do valor de aquisição (0,25);

TPH = produtividade operacional (t h^{-1}).

Os valores de aquisição foram informados pela empresa onde os dados foram coletados, sendo de R$ 1.950.000,00 para a CH570 e R$ 3.600.000,00 para a CH950, com vida útil estimada em 22.000 horas — cerca de 2.200 horas por ano ao longo de dez anos —, valor residual de 25% do valor de aquisição e depreciação linear. O custo operacional total por tonelada resultou da soma dos três componentes, conforme a Equação 22.

- $$C_{total} = C_{comb} + C_{mo} + C_{dep} \quad (22)$$

Onde:

C_{total} = custo operacional total por tonelada (R$/t);

C_{comb} = custo de combustível por tonelada (R$/t);

C_{mo} = custo de mão de obra por tonelada (R$/t);

C_{dep} = custo de depreciação por tonelada (R$/t).

As premissas adotadas na análise de custo estão reunidas na Tabela 7.

Tabela 7. Premissas adotadas na análise de custo operacional.

Premissa	**Valor**	**Fonte**
Preço do diesel	R$ 6,46/L	ANP (2025)
Salário-base mensal	R$ 3.200,00	Premissa de cálculo
Fator de encargos e provisões	1,62	Premissa de cálculo
Jornada mensal	220 h (27,5 turnos de 8 h)	Premissa de cálculo
Benefícios por turno	R$ 35,00	Premissa de cálculo
Turnos diários de operação	3	Operação da empresa
Valor de aquisição – CH570	R$ 1.950.000,00	Empresa
Valor de aquisição – CH950	R$ 3.600.000,00	Empresa
Vida útil	22.000 horas	Premissa de cálculo
Valor residual	25% do valor de aquisição	Premissa de cálculo
Método de depreciação	Linear	Premissa de cálculo

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Delineamento amostral e critérios de comparação entre modelos

A comparação baseou-se em dezesseis observações por modelo, correspondentes às quatro máquinas acompanhadas ao longo dos quatro meses de safra.

As Tabelas 8A e 8B reúnem, para cada uma das doze variáveis analisadas, as estatísticas descritivas por modelo, os resultados dos testes de pressupostos e da comparação inferencial, o tamanho de efeito e a diferença percentual entre os modelos. A leitura conjunta permite identificar, de forma consolidada, em quais indicadores os modelos diferiram de maneira estatisticamente significativa e em quais o desempenho se mostrou equivalente.

De modo geral, os resultados revelam um padrão coerente: as maiores diferenças concentraram-se nos indicadores de produção e capacidade operacional, com vantagem expressiva do CH950, enquanto vários indicadores de qualidade da colheita e de consumo não apresentaram diferença relevante entre os modelos. Esse panorama indica que a principal distinção entre as duas configurações de colhedora está na capacidade de processamento, e não em uma alteração generalizada de todos os aspectos da operação. Esse padrão é coerente com a arquitetura das máquinas: a duplicação dos conjuntos de alimentação e corte amplia o fluxo de material processado por passada, o que se traduz em produção e produtividade, enquanto o consumo por tonelada e os indicadores de qualidade dependem mais das regulagens, das condições do canavial e da condução da operação do que do número de linhas colhidas (MA et al., 2014; RAMOS et al., 2016b). A exceção foi o arranquio, discutido no item 4.4, cuja diferença aponta a regulagem do corte de base como ponto de atenção específico da configuração de duas linhas.

Tabela 8A. Estatística descritiva, testes de pressupostos e comparação inferencial entre CH570 e CH950 (n = 16 por modelo).

Variável	CH570 (média ± dp)	CH950 (média ± dp)	Normal CH570	Normal CH950	Variâncias iguais	Teste utilizado
Toneladas colhidas	16.658,40 ± 2.357,15	33.481,98 ± 5.486,68	SIM	SIM	NÃO	Teste t de Welch
Horas trabalhadas	322,39 ± 55,68	350,97 ± 35,55	SIM	SIM	SIM	Teste t de Student
Produtividade (t h^{-1})	52,82 ± 9,95	95,00 ± 9,16	SIM	SIM	SIM	Teste t de Student
Consumo específico (L t^{-1})	0,89 ± 0,15	0,89 ± 0,18	SIM	NÃO	SIM	Mann-Whitney U
Produtividade agrícola (t ha^{-1})	63,00 ± 17,80	61,05 ± 11,49	NÃO	NÃO	SIM	Mann-Whitney U
Velocidade (km h^{-1})	4,86 ± 0,46	4,65 ± 0,52	SIM	NÃO	SIM	Mann-Whitney U
Disponibilidade (%)	96,88 ± 2,08	92,43 ± 3,04	NÃO	SIM	SIM	Mann-Whitney U
Eficiência operacional (%)	60,37 ± 4,84	63,26 ± 3,58	NÃO	NÃO	SIM	Mann-Whitney U
Perdas (%)	1,49 ± 0,93	1,43 ± 0,39	NÃO	SIM	SIM	Mann-Whitney U
Pisoteio (%)	2,72 ± 6,26	2,33 ± 3,02	NÃO	NÃO	SIM	Mann-Whitney U
Abalamento (%)	0,73 ± 0,74	0,81 ± 0,52	NÃO	NÃO	SIM	Mann-Whitney U
Arranquio (%)	0,66 ± 0,97	0,93 ± 0,61	NÃO	SIM	SIM	Mann-Whitney U

Tabela 8B. Estatística descritiva, testes de pressupostos e comparação inferencial entre CH570 e CH950 (n = 16 por modelo).

Variável	p-valor	d de Cohen	Efeito	Diferença	Percentual (%)	Significativo
Toneladas colhidas	<0,001	3,9842	Grande	16.823,58	101,0	SIM
Horas trabalhadas	0,0939	0,6118	Médio	28,58	8,9	NÃO
Produtividade (t h^{-1})	<0,001	4,4108	Grande	42,18	79,9	SIM
Consumo específico (L t^{-1})	0,5095	0,0245	Insignificante	0,00	0,4	NÃO
Produtividade agrícola (t ha^{-1})	0,7765	0,1302	Insignificante	-1,95	-3,1	NÃO
Velocidade (km h^{-1})	0,1366	0,4252	Pequeno	-0,21	-4,3	NÃO
Disponibilidade (%)	<0,001	1,7098	Grande	-4,45	-4,6	SIM
Eficiência operacional (%)	0,0201	0,6792	Médio	2,89	4,8	SIM
Perdas (%)	0,6064	0,0960	Insignificante	-0,07	-4,6	NÃO
Pisoteio (%)	0,4857	0,0814	Insignificante	-0,40	-14,7	NÃO
Abalamento (%)	0,3730	0,1174	Insignificante	0,07	10,3	NÃO
Arranquio (%)	0,0408	0,3247	Pequeno	0,26	39,6	SIM

4.2 Indicadores de produção e eficiência operacional

Observou-se diferença expressiva entre os modelos para toneladas colhidas, com média de 16.658,40 t no CH570 e 33.481,98 t no CH950, resultando em diferença média de 16.823,58 t (≈ +101% no CH950). A comparação indicou diferença estatisticamente significativa (teste t de Welch; $p < 0,001$) e tamanho de efeito grande ($d = 3,98$), indicando que a diferença é não apenas estatística, mas também operacionalmente relevante.

Esse resultado concorda com Silva e Folmann (2017), que registraram produção diária média de 444,52 t para a colhedora de uma linha e 847,72 t para a de duas linhas, aumento de 91%. Embora Silva e Folmann (2017) tenham utilizado toneladas por dia e o presente estudo tenha consolidado a produção por máquina e mês, ambos mostram aumento expressivo do volume colhido pela configuração de duas linhas; por isso, a comparação é válida quanto à direção e à magnitude relativa, mas não quanto aos valores absolutos.

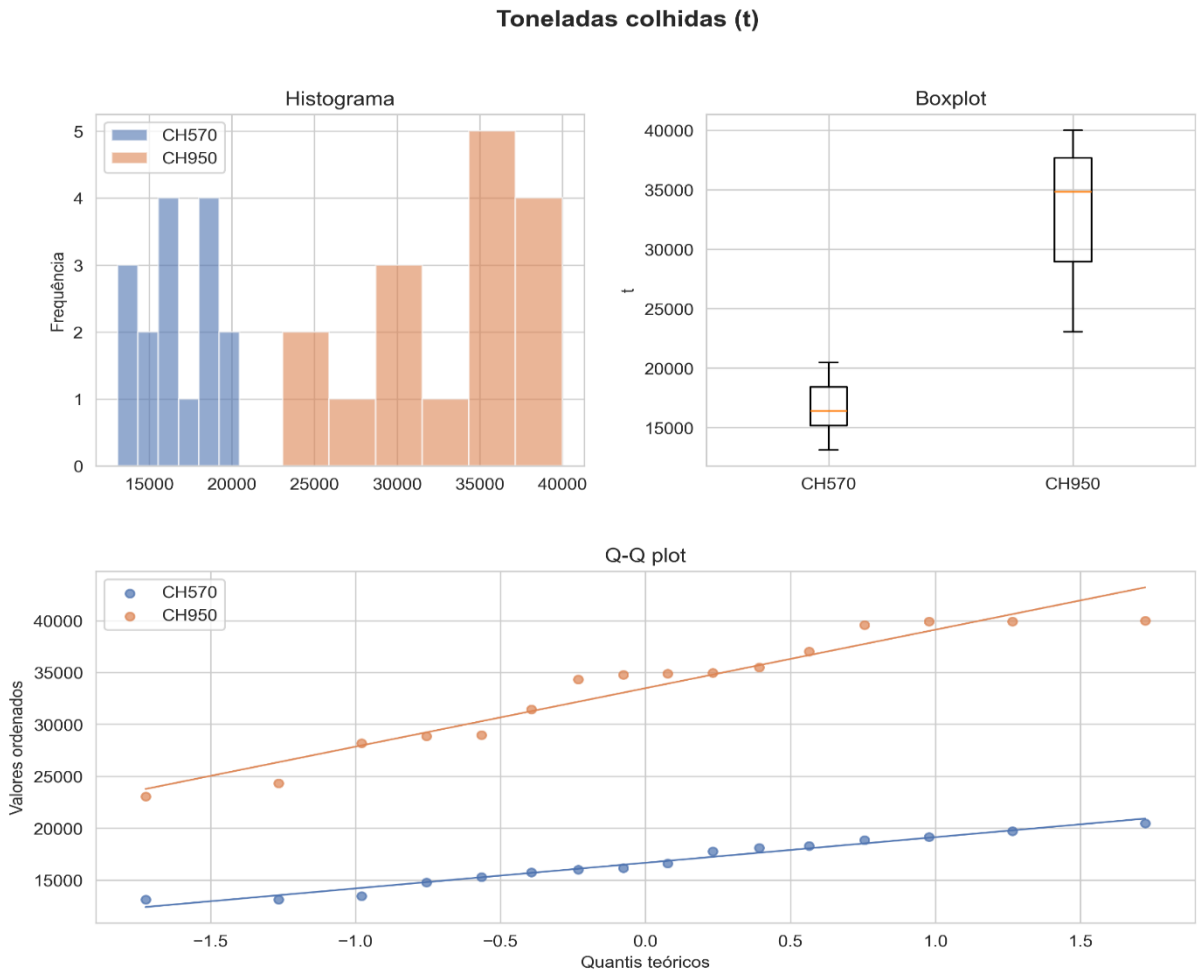


Figura 15. Distribuição (histograma), box plot e Q-Q plot para Toneladas Colhidas: comparação CH570 vs CH950.

Para horas trabalhadas, as médias foram 322,39 h (CH570) e 350,97 h (CH950), com diferença de 28,58 h (≈ +8,9% no CH950). Contudo, a diferença não foi estatisticamente significativa (teste t de Student; p = 0,094) e apresentou efeito médio (d = 0,61). Esse resultado sugere que, no período, a superioridade do CH950 em volume colhido foi mais associada à capacidade produtiva do que simplesmente ao aumento de horas.

A ausência de diferença significativa nas horas trabalhadas indica que os dois modelos tiveram jornadas equivalentes no período, com variação compatível com a rotina de uma operação comercial. Como as horas efetivamente trabalhadas dependem da disponibilidade da máquina, da organização da frente e dos tempos não produtivos associados a manobras, deslocamentos e esperas por transbordo (LINHARES et al., 2012; DO NASCIMENTO et al., 2020), esse resultado reforça que o maior volume colhido pela CH950 decorreu da capacidade de processamento, discutida a seguir, e não de um tempo de operação maior.

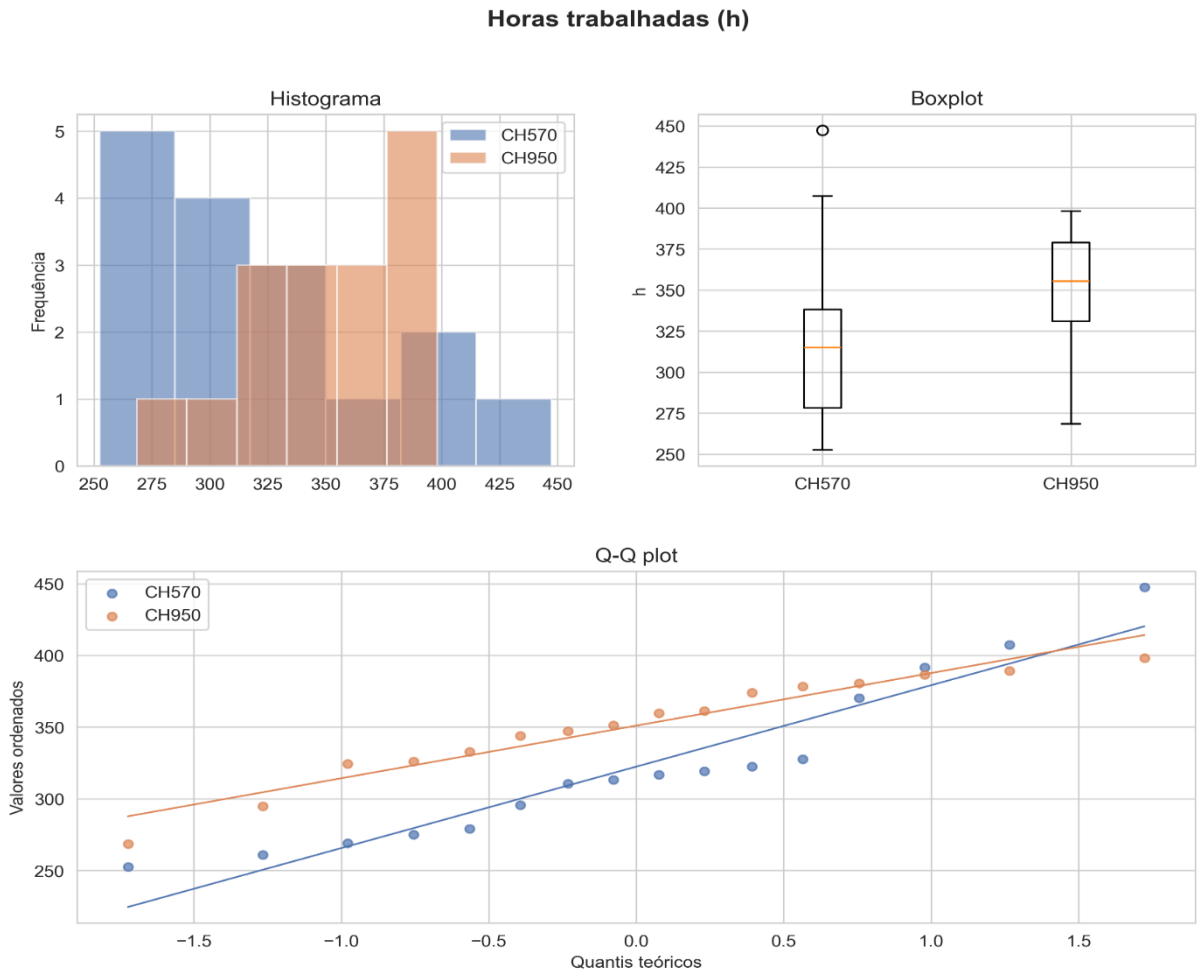


Figura 16. Distribuição (histograma), box plot e Q-Q plot para Horas Trabalhadas: comparação CH570 vs CH950.

A produtividade apresentou aumento consistente no CH950: 52,82 t h⁻¹ (CH570) versus 95,00 t h⁻¹ (CH950), com diferença de 42,18 t h⁻¹ (≈ +79,9%). O teste indicou diferença significativa (teste t de Student; $p < 0,001$) e efeito grande ($d = 4,41$). Em termos operacionais, este achado é compatível com uma maior capacidade de colheita do conjunto mecanizado no CH950 sob as condições avaliadas.

O resultado é coerente com Testa et al. (2016) que obtiveram capacidade de campo efetiva de 0,56 ha h⁻¹ para uma linha e 1,08 ha h⁻¹ para duas linhas, aumento aproximado de 93%, e com Silva e Folmann (2017), que registraram 32,72 e 46,67 t h⁻¹, respectivamente, aumento de 43%. O ganho de 79,9% observado no presente estudo situa-se entre essas respostas e é compatível com a maior largura de trabalho da configuração de duas linhas.

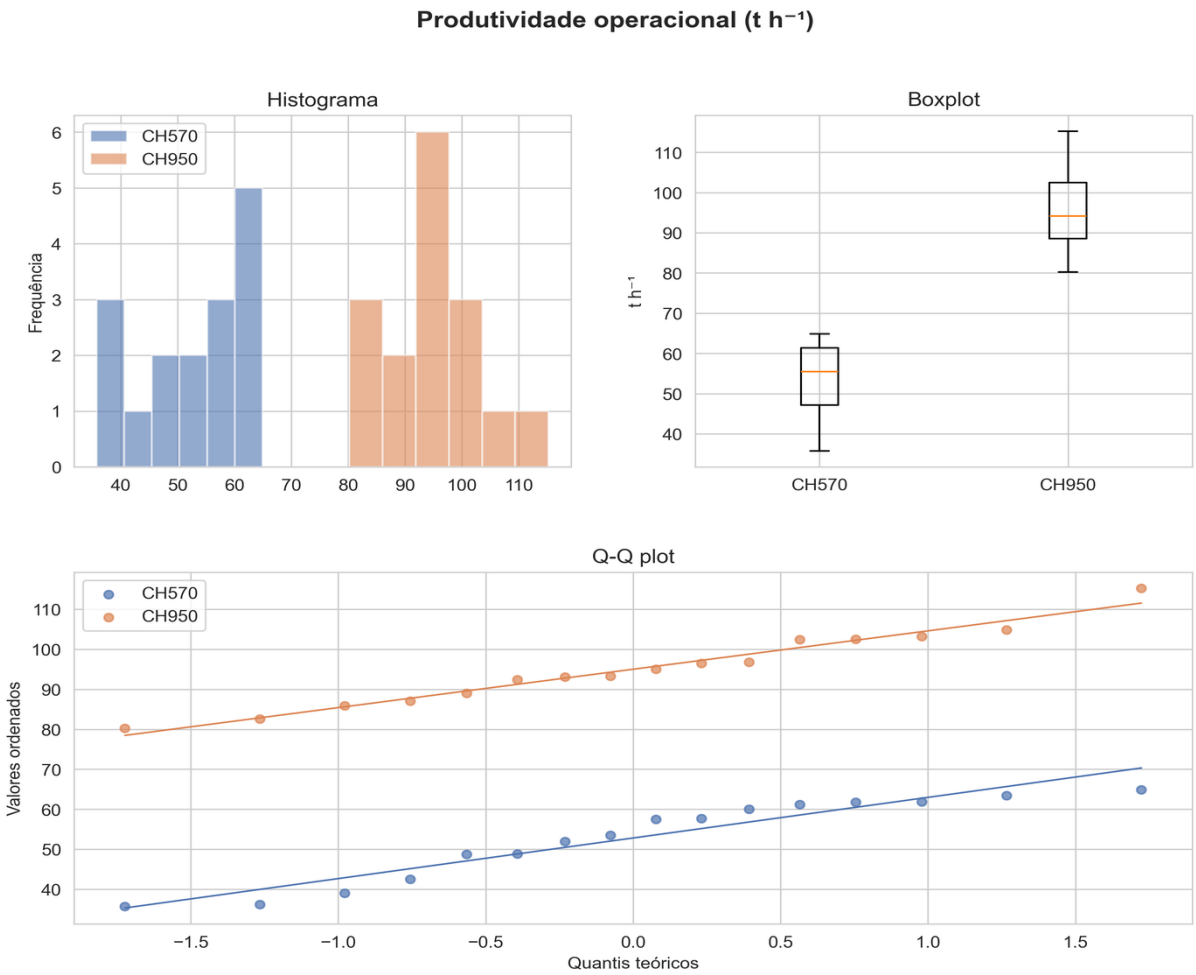


Figura 17. Distribuição (histograma), box plot e Q-Q plot para Produtividade (t h⁻¹): comparação CH570 vs CH950.

Apesar de o CH570 apresentar média ligeiramente superior (4,86 km h^{-1}) em relação ao CH950 (4,65 km h^{-1}), a diferença (−0,21 km h^{-1}, ≈ −4,3%) não foi significativa (Mann–Whitney; p = 0,137) e teve efeito pequeno (d = 0,43). Assim, no período avaliado, a maior produtividade do CH950 parece não depender de aumento de velocidade, mas do desempenho global do processo.

Silva e Folmann (2017) observaram que a colhedora de duas linhas manteve maior rendimento mesmo trabalhando em velocidade inferior, enquanto, no presente estudo, não foi identificada diferença estatisticamente significativa de velocidade. As médias de 4,65 a 4,86 km h^{-1} também se situam próximas da velocidade de 5,0 km h^{-1} avaliada por Xavier et al. (2020), na qual ocorreram menores perdas visíveis sob as condições daquele experimento, e por Martins et al. (2017), que registraram menor consumo médio por tonelada na maior velocidade ensaiada. Esses resultados apenas contextualizam a faixa operacional adotada e não demonstram que ela seja ótima para todas as condições de campo.

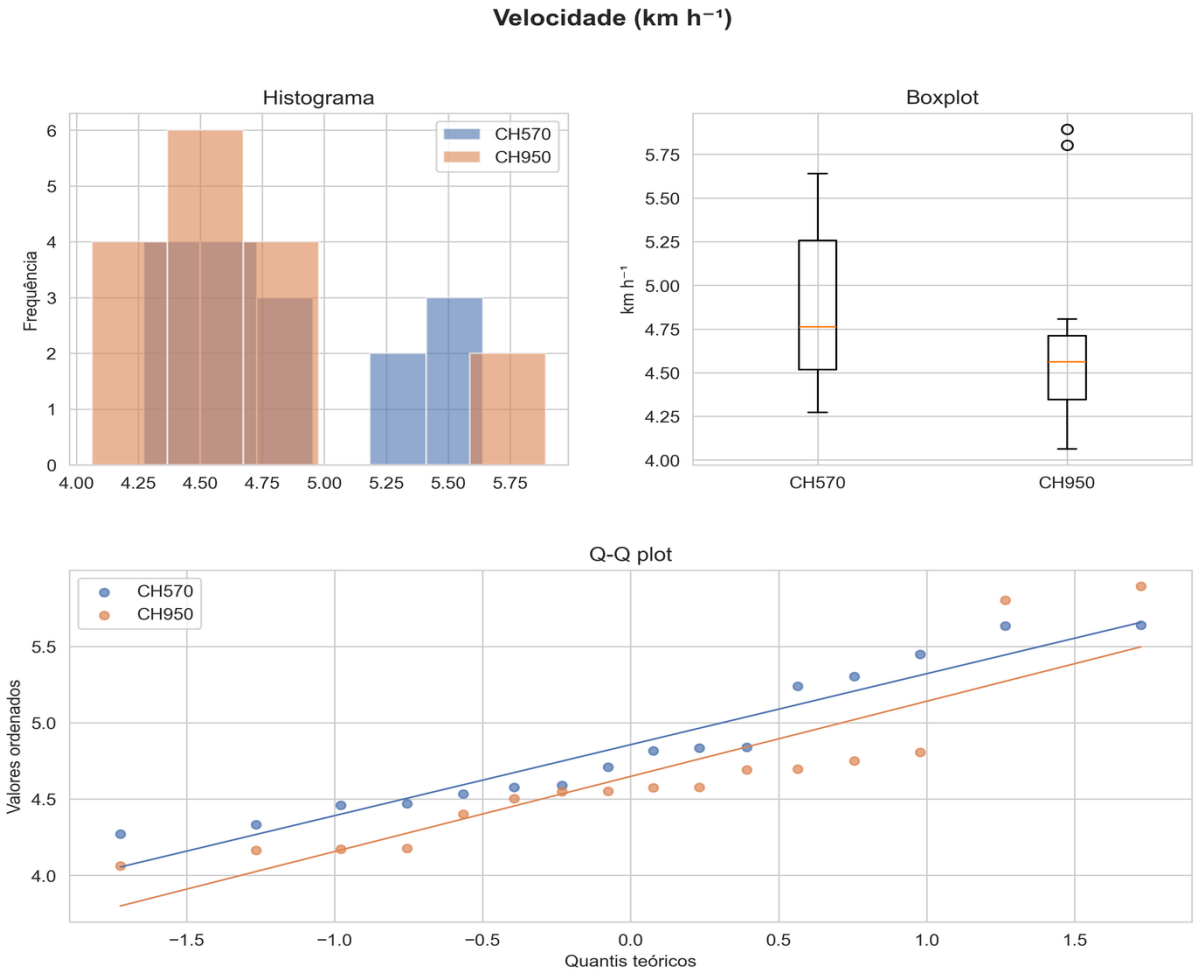


Figura 18. Distribuição (histograma), box plot e Q-Q plot para Velocidade (km h^{-1}): comparação CH570 vs CH950.

O consumo específico foi praticamente equivalente: 0,89 L t^{-1} em ambos os modelos, sem diferença relevante (Mann–Whitney; p = 0,510; d = 0,02). Esse achado sugere que o ganho de produtividade no CH950 não implicou piora do consumo por tonelada no período analisado.

O valor de 0,89 L t^{-1} encontra-se próximo da média de 0,9 L t^{-1} obtida por Martins et al. (2017) na velocidade de 5,0 km h^{-1}, em canaviais de 65 e 80 t ha^{-1}, e acima dos 0,54 e 0,52 L t^{-1} registrados por Giachini et al. (2016) em canavial de 100,5 t ha^{-1}. Quanto à comparação entre configurações, Testa et al. (2016) observaram 0,97 L t^{-1} para uma linha e 0,65 L t^{-1} para duas linhas, enquanto Silva e Folmann (2017) registraram 1,69 e 1,16 L t^{-1}, respectivamente. Assim, a ausência de diferença no presente estudo diverge desses dois trabalhos. A produtividade agrícola mais baixa pode ser uma hipótese explicativa, mas seu efeito sobre a diferença entre os modelos não foi testado nesta pesquisa.

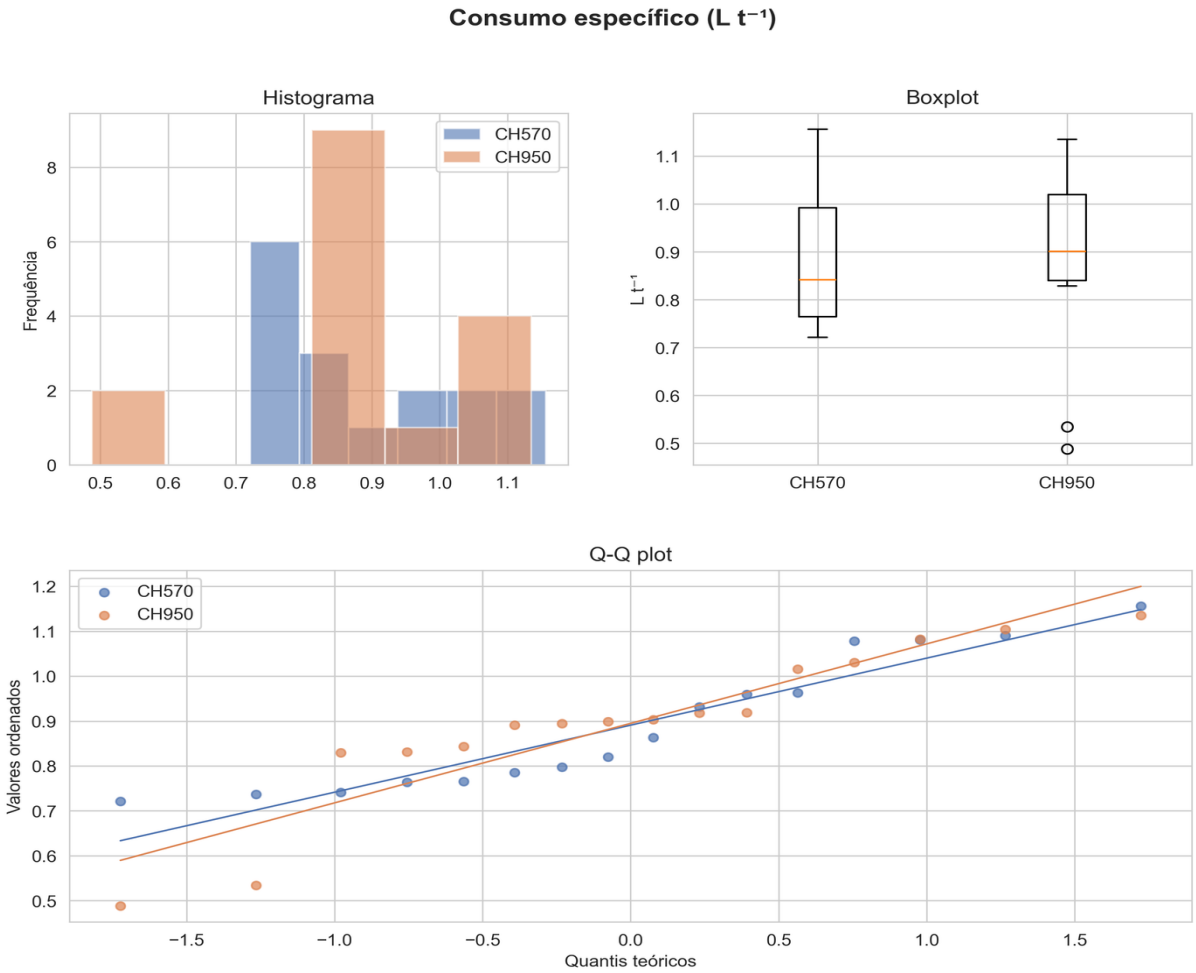


Figura 19. Distribuição (histograma), box plot e Q-Q plot para Consumo específico (L t^{-1}): comparação CH570 vs CH950.

A produtividade agrícola foi semelhante entre os modelos: 63,00 t ha⁻¹ (CH570) e 61,05 t ha⁻¹ (CH950), com diferença de −1,95 t ha⁻¹ (≈ −3,1%), não significativa (Mann–Whitney; p = 0,777). Portanto, as diferenças de desempenho operacional observadas não se explicam por variação relevante de produtividade agrícola no conjunto analisado.

As produtividades agrícolas observadas foram próximas da condição de 65 t ha⁻¹ avaliada por Martins et al. (2017) e inferiores aos 83,5 t ha⁻¹ de Testa et al. (2016), aos 95 t ha⁻¹ de Xavier et al. (2020) e aos 100,5 t ha⁻¹ de Giachini et al. (2016). Essa comparação mostra que o estudo foi conduzido em ambiente de produtividade agrícola relativamente baixa em relação à parte da literatura utilizada e reforça a necessidade de restringir as conclusões às condições avaliadas.

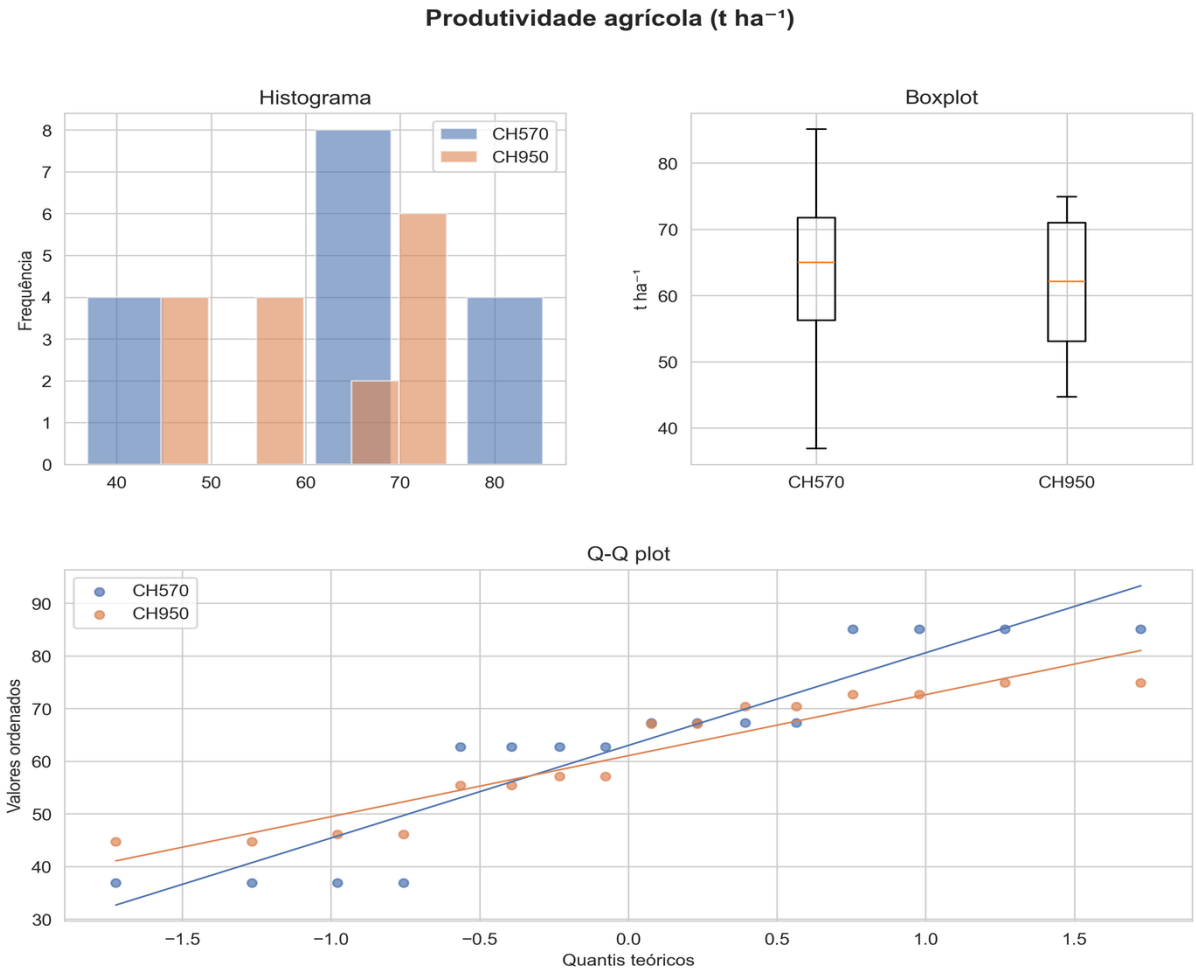


Figura 20. Distribuição (histograma), box plot e Q-Q plot para Produtividade agrícola (t ha⁻¹): comparação CH570 vs CH950.

4.3 Disponibilidade e eficiência operacional do equipamento

A disponibilidade foi maior no CH570 (96,88%) do que no CH950 (92,43%), com diferença de −4,45 p.p. (≈ −4,6%), estatisticamente significativa (Mann–Whitney; $p < 0,001$) e com efeito grande ($d = 1,71$). Esse resultado aponta que, embora o CH950 entregue maior produção e produtividade, o CH570 apresentou melhor consistência de disponibilidade no intervalo observado.

Esse comportamento é coerente com a maior complexidade de subsistemas da máquina de duas linhas (Quadro 1). Do Nascimento et al. (2020), acompanhando colhedoras de cana ao longo de duas safras e meia, verificaram que o tempo dedicado à manutenção correspondeu a 26–28% do tempo total de operação, com 63% das paradas de natureza corretiva, evidenciando a manutenção como principal ofensor do tempo produtivo dessas máquinas. Nesse contexto, o aproveitamento da capacidade da CH950 depende de estrutura de manutenção dimensionada para sua maior demanda de intervenções.

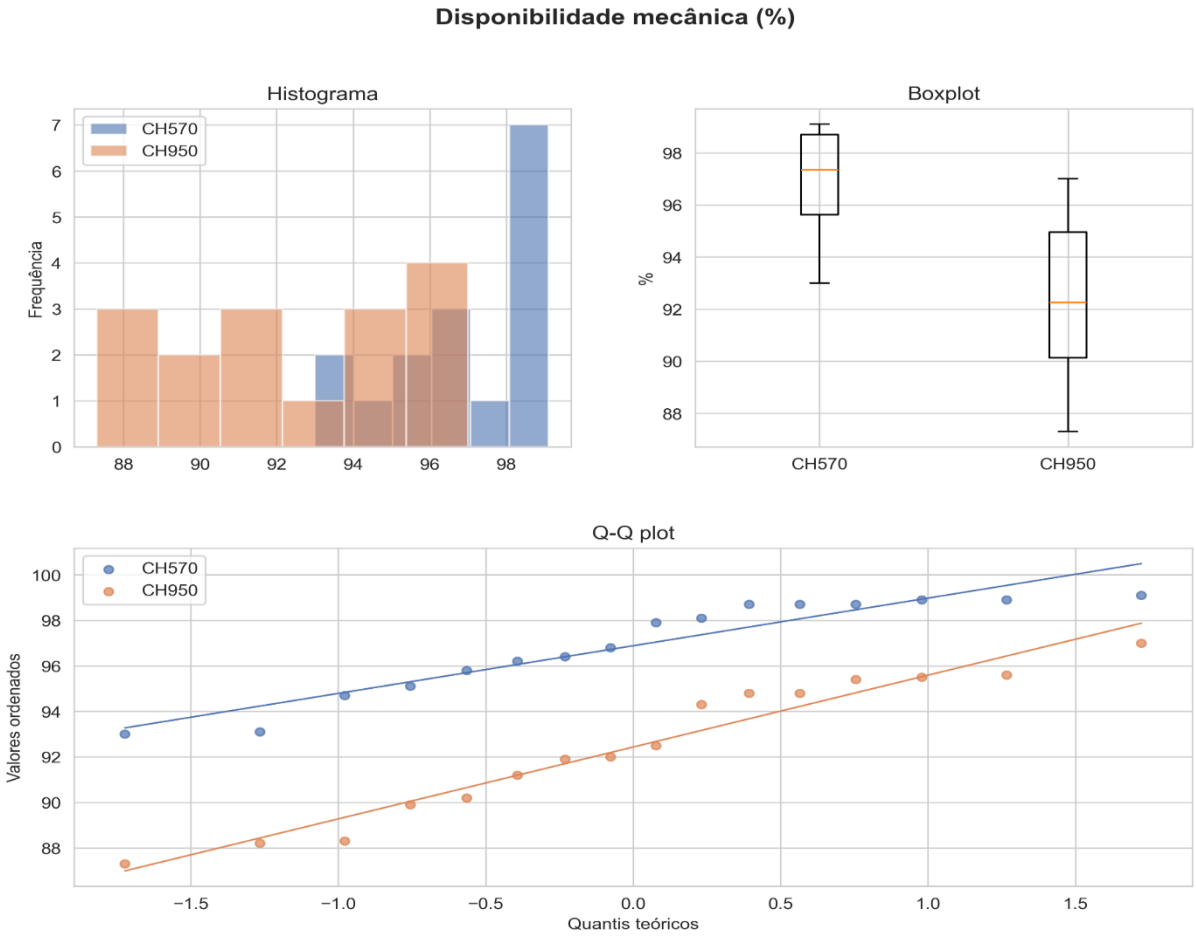


Figura 21. Distribuição (histograma), box plot e Q-Q plot para Disponibilidade (%): comparação CH570 vs CH950.

A eficiência operacional foi maior no CH950 (63,26%) que no CH570 (60,37%), com diferença de +2,89 p.p. (≈ +4,8%), significativa (Mann–Whitney; p = 0,020) e com efeito médio (d = 0,68). Em conjunto, disponibilidade menor e eficiência operacional maior no CH950 podem refletir uma estratégia operacional em que o equipamento é mais demandado quando disponível, mesmo com maior variabilidade ou ocorrência de paradas.

As eficiências operacionais de 60,37% e 63,26% ficaram próximas dos 62% adotados por Bastos e Landell (2016) para colhedoras de cana. Ramos et al. (2016a) demonstraram que talhões mais curtos reduzem a eficiência operacional e aumentam o consumo, enquanto o desligamento das funções de colheita durante manobras, esperas e deslocamentos proporcionou economia de combustível de até 30%. Esses trabalhos sustentam que a eficiência operacional depende da organização da frente e das interrupções operacionais.

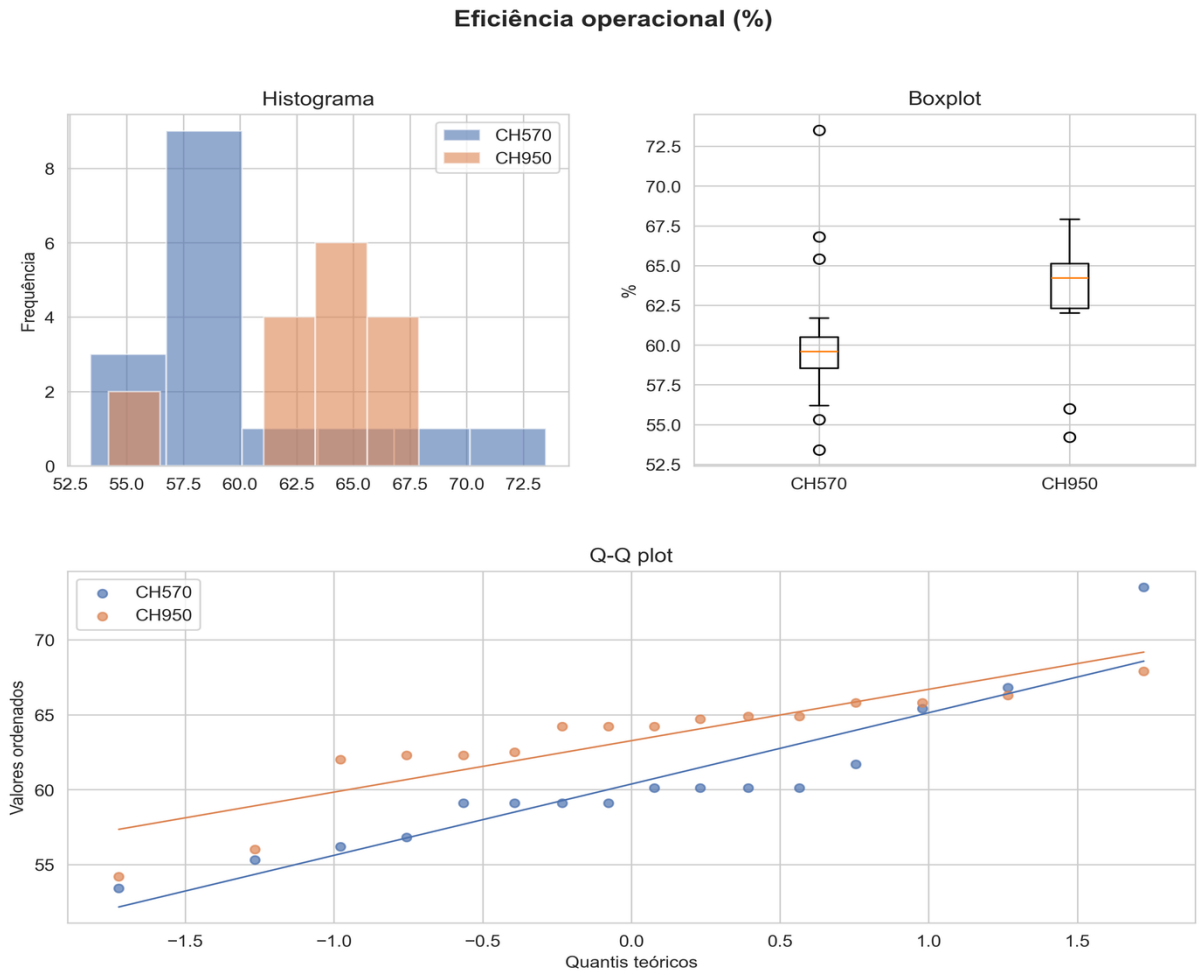


Figura 22. Distribuição (histograma), box plot e Q-Q plot para Eficiência operacional (%): comparação CH570 vs CH950.

4.4 Indicadores de qualidade da colheita

A qualidade da colheita mecanizada é frequentemente discutida sob duas dimensões principais: perdas de matéria-prima e danos à soqueira e à base de corte. Estudos mostram que o monitoramento de perdas visíveis e danos, como tocos arrancados ou fragmentados, é relevante tanto para a eficiência do processo quanto para a longevidade do canavial (CASSIA et al., 2014; XAVIER et al., 2020; RUNGMEKARAT et al., 2023; TESTA et al., 2023).

As perdas apresentaram médias próximas: 1,49% (CH570) e 1,43% (CH950), sem diferença significativa (Mann–Whitney; $p = 0,606$; $d = 0,10$). Assim, o aumento de capacidade produtiva da CH950 não foi acompanhado de aumento detectável nas perdas percentuais.

Segundo Benedini et al. (2009 apud GIACHINI et al., 2016), perdas inferiores a 2,5% são classificadas como baixas; portanto, os dois modelos permaneceram nessa classe. Os valores também se situam na faixa de 0,88% a 2,20% encontrada por Giachini et al. (2016) e são compatíveis com o máximo estimado de 2,09 Mg ha^{-1}, aproximadamente 2,2%, relatado por Xavier et al. (2020). Foram inferiores aos 3,4% a 4,0% observados por Rungmekarat et al. (2023) e aos 9,3% e 11,2% registrados por Noronha et al. (2011) nos turnos diurno e noturno. Essas diferenças podem refletir métodos de amostragem, condições do canavial, regulagens, turnos e gerações de equipamentos, não sendo possível atribuí-las a uma única causa. A ausência de diferença entre CH570 e CH950 é compatível com Carmo et al. (2021), que não identificaram efeito significativo da marca/modelo na base compilada, embora o estudo tenha utilizado apenas 17 observações provenientes de quatro trabalhos.

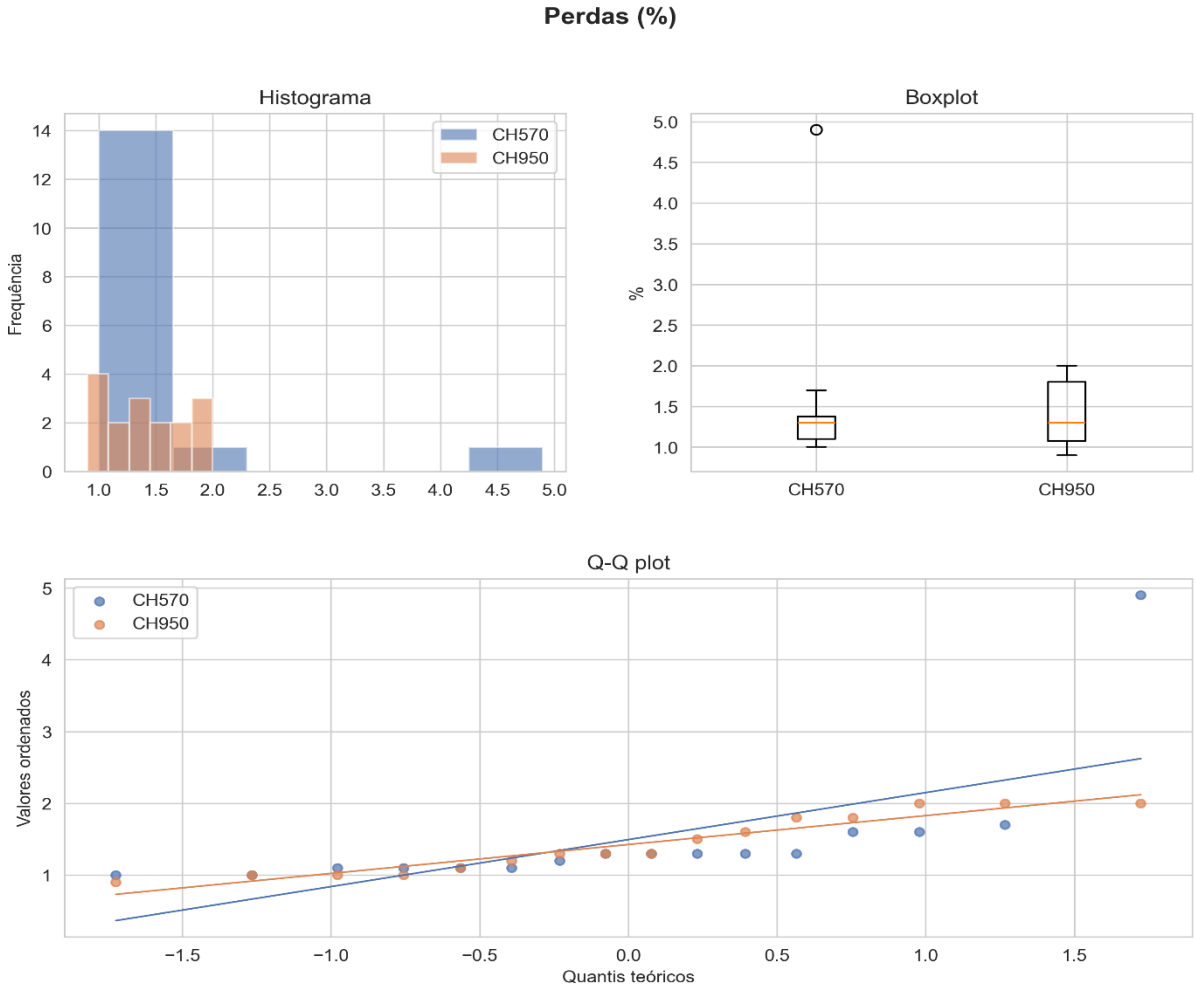


Figura 23. Distribuição (histograma), box plot e Q-Q plot para Perdas (%): comparação CH570 vs CH950.

O pisoteio também não diferiu estatisticamente (2,72% no CH570 vs 2,33% no CH950; p = 0,486), com efeito pequeno. Esse comportamento pode indicar que, no período e nas áreas avaliadas, o pisoteio foi mais dependente de condições operacionais, como tráfego, manobras e logística, do que do modelo.

Silva e Folmann (2017) descrevem a redução de tráfego e pisoteio como uma vantagem potencial da colheita de duas linhas, em razão do menor número de passadas necessário para colher a mesma área. No presente estudo, contudo, essa expectativa não foi confirmada estatisticamente. A interpretação é compatível com Zamykal e Everingham (2009) e Caraski e Mingotte (2015), que destacam o direcionamento automático, o alinhamento e o controle de tráfego como fatores relevantes para a preservação das linhas de cultivo. Assim, a configuração de duas linhas, isoladamente, não garantiu menor pisoteio no período avaliado.

Esse resultado precisa ser lido à luz do controle de tráfego adotado: como as duas configurações operam sobre as mesmas linhas definidas no plantio e com piloto automático, o número de passadas por área tende a ser o principal determinante do pisoteio. A vantagem teórica da máquina de duas linhas, que percorre metade das passadas para colher a mesma área, pode ser atenuada pelo tráfego do transbordo, que acompanha as duas configurações, e pelas manobras de cabeceira.

A Tabela 9 detalha o pisoteio por equipamento e mês. Os valores mais altos concentram-se em poucas máquinas-mês: na CH570, o valor de 25,0% registrado em junho refere-se a uma única máquina, enquanto as demais avaliações do modelo não ultrapassaram 6,5%; na CH950, duas máquinas responderam pelos maiores valores, com até 10,0% em setembro, e as outras duas permaneceram praticamente sem pisoteio ao longo do período. Em 16 das 32 avaliações o pisoteio foi nulo ou inferior a 0,2%, o que reforça a leitura de que o indicador responde mais às condições de tráfego e à condução da operação do que à configuração da máquina.

Tabela 9. Pisoteio (%) por equipamento e mês.

Modelo	Máquina	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Média
CH570	1	25,0	1,4	0,0	0,0	6,6
CH570	2	3,3	0,0	6,5	0,1	2,5
CH570	3	4,4	0,0	0,0	0,2	1,1
CH570	4	0,0	0,0	2,5	0,2	0,7
Média CH570	—	8,2	0,4	2,2	0,1	2,7
CH950	1	0,0	3,5	0,0	0,0	0,9
CH950	2	0,6	0,0	0,1	0,0	0,2
CH950	3	4,2	1,3	6,3	6,5	4,6
CH950	4	2,7	1,3	0,7	10,0	3,7
Média CH950	—	1,9	1,5	1,8	4,1	2,3

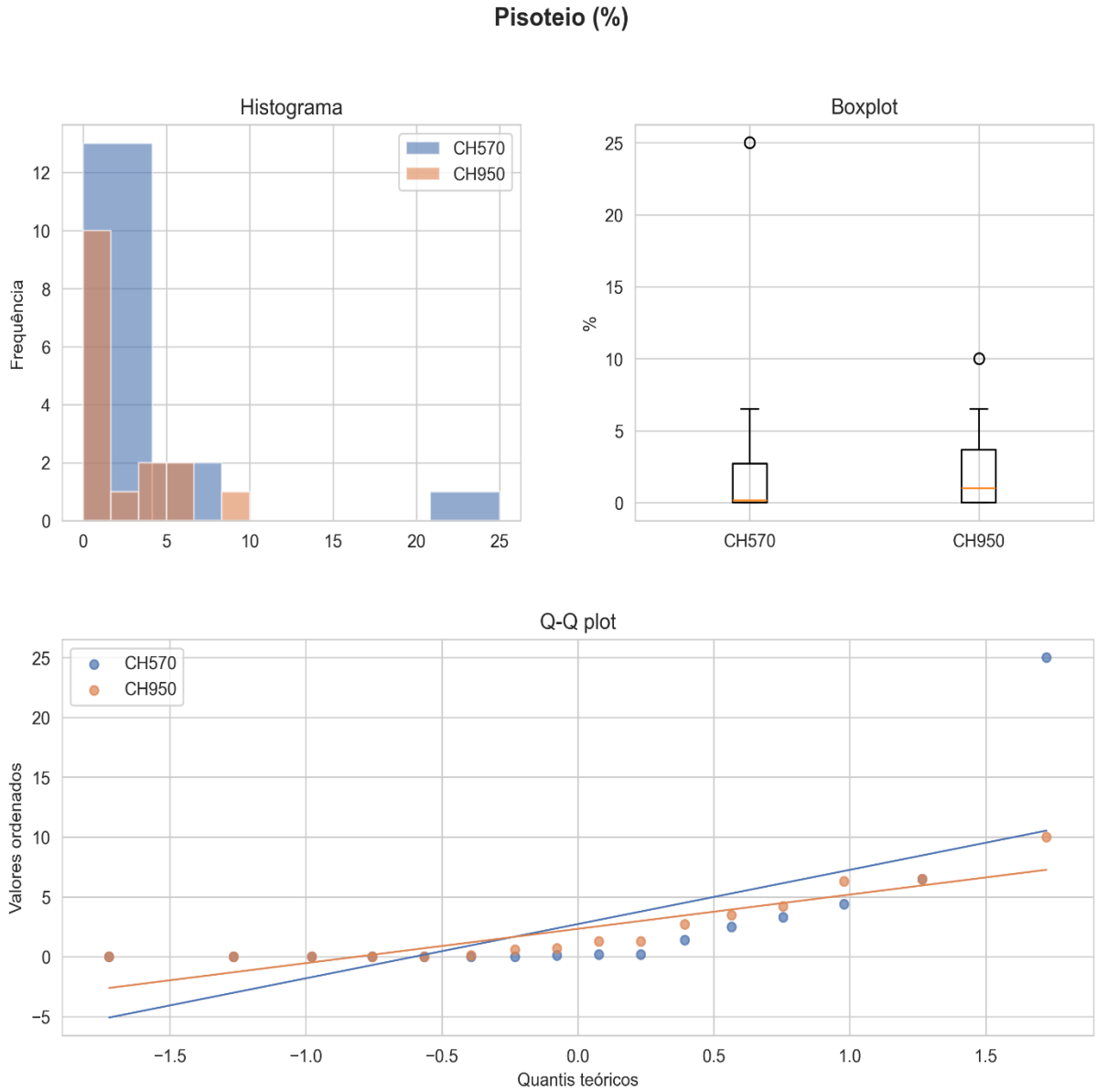


Figura 24. Distribuição (histograma), box plot e Q-Q plot para pisoteio (%): comparação CH570 vs CH950.

O abalamento apresentou médias de 0,73% (CH570) e 0,81% (CH950), sem diferença significativa (p = 0,373). Portanto, não houve evidência de que um modelo tenha ampliado este tipo de impacto no conjunto analisado.

Silva e Folmann (2017) encontraram 23,14% de abalo para a colhedora de uma linha e 18,78% para a de duas linhas, enquanto o presente estudo registrou valores substancialmente menores e sem diferença estatisticamente detectável. As magnitudes não devem ser comparadas diretamente, porque os procedimentos e as condições de avaliação diferem, mas a redução do abalo na configuração de duas linhas observada por Silva e Folmann (2017) não se repetiu neste trabalho. Cássia et al. (2014) mostraram adicionalmente que os danos às soqueiras variaram

conforme a face de corte e o desgaste das facas, reforçando a influência de fatores operacionais sem demonstrar que o modelo da colhedora seja irrelevante.

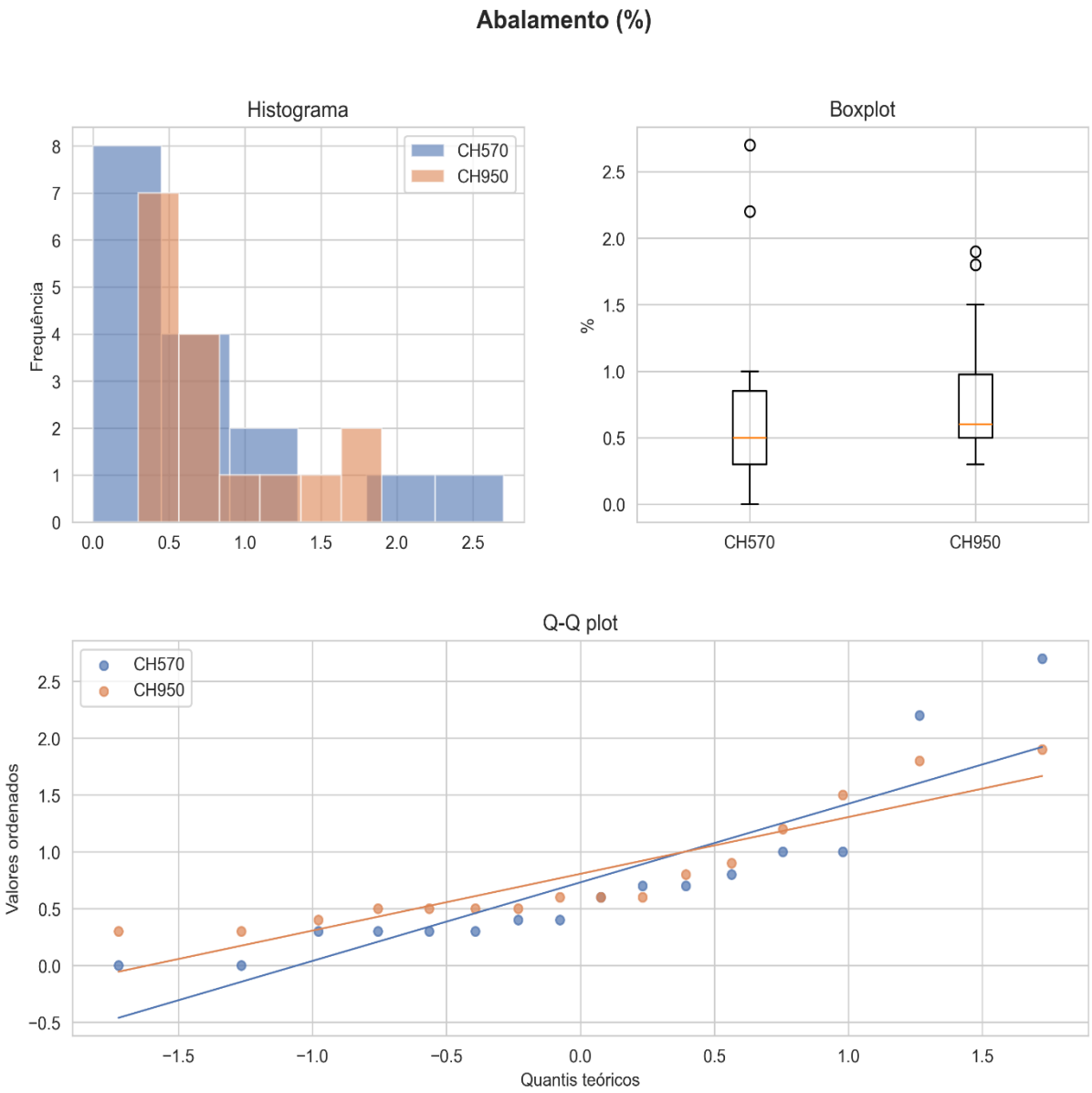


Figura 25. Distribuição (histograma), box plot e Q-Q plot para Abalamento (%): comparação CH570 vs CH950.

O arranquio foi maior no CH950 (0,93%) do que no CH570 (0,66%), com diferença de +0,26 p.p. (≈ +39,6%), estatisticamente significativa (Mann–Whitney; p = 0,041) e efeito pequeno (d = 0,32). Como o arranquio se relaciona a danos à soqueira e à base de corte, o resultado merece atenção, porque a literatura associa danos e irregularidades de corte a impactos na rebrota e na qualidade operacional do processo, além de potencial aumento de impurezas e perdas indiretas dependendo do contexto.

Silva e Folmann (2017) encontraram direção oposta, com 12,30% de arranquio na colhedora de uma linha e 6,56% na de duas linhas. No presente estudo, as magnitudes foram muito menores, mas a CH950 apresentou o maior valor. A divergência pode estar relacionada às diferenças de método, solo, nivelamento, altura de corte, estado das facas, regulagem e condução, fatores que não foram isolados estatisticamente nesta pesquisa. Portanto, o resultado justifica monitoramento e investigação específica, mas não permite concluir que o arranquio seja uma limitação intrínseca da CH950 nem que decorra necessariamente de desajuste de regulagem.

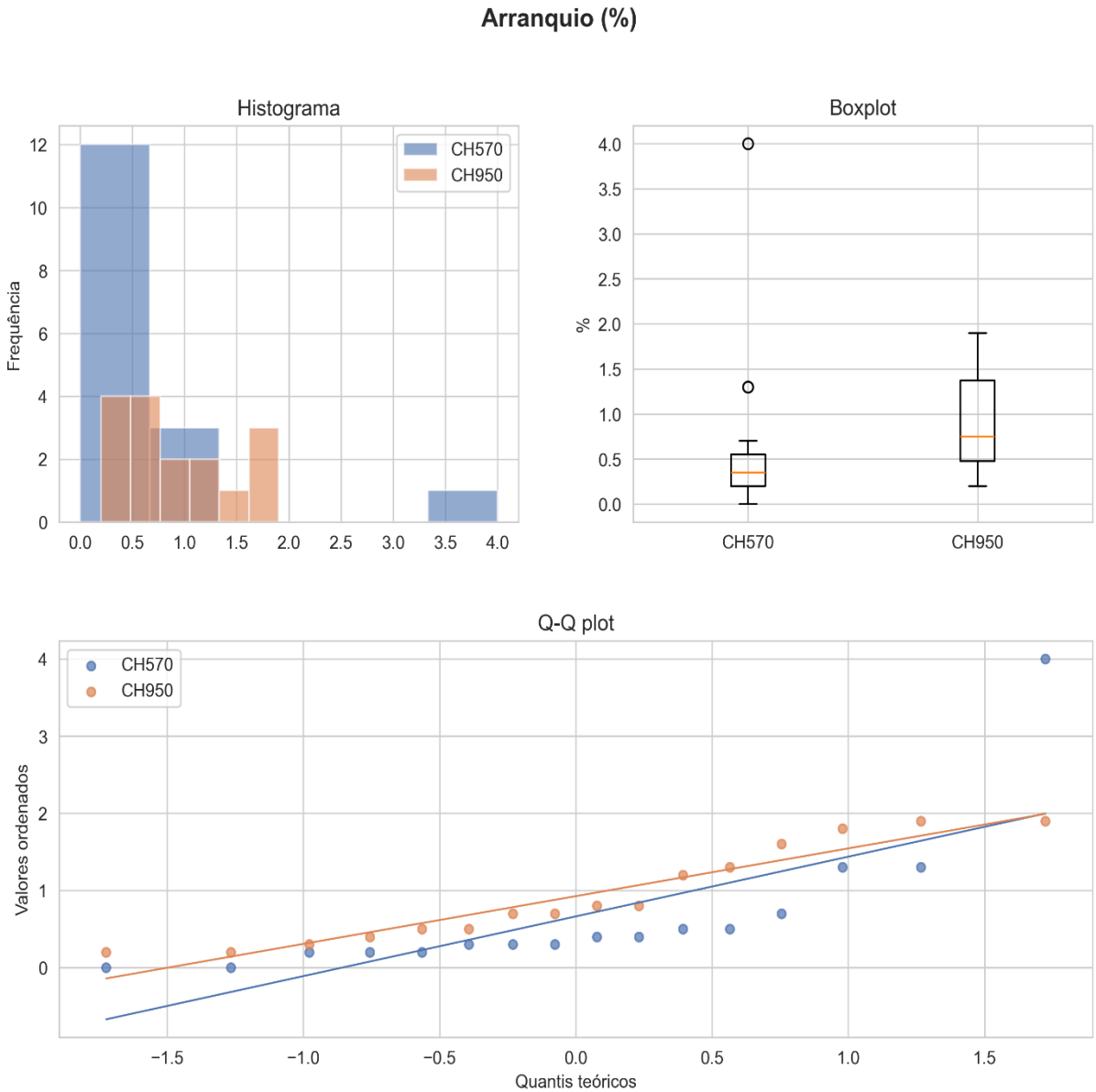


Figura 26. Distribuição (histograma), box plot e Q-Q plot para Arranquio (%): comparação CH570 vs CH950.

4.5 Análise de custo operacional

A partir dos indicadores de produção e consumo levantados, estimou-se o custo operacional por tonelada de cada modelo, considerando os três componentes diretos descritos na metodologia: combustível, mão de obra e depreciação. Os resultados estão sintetizados na Tabela 10 e ilustrados na Figura 27.

Tabela 10. Custo operacional por tonelada estimado para os modelos CH570 e CH950.

Componente	**CH570 (R$/t)**	**CH950 (R$/t)**
Combustível	5,75	5,75
Mão de obra	1,23	0,62
Depreciação	1,26	1,29
Total	8,24	7,66

O custo com combustível foi equivalente entre os modelos (R$ 5,75/t), resultado coerente com o consumo específico praticamente idêntico observado na análise estatística, em que não houve diferença significativa entre as máquinas. Assim, apesar de colher o dobro do volume, a CH950 manteve o mesmo consumo por tonelada, não onerando esse componente.

O custo com mão de obra foi o que apresentou maior diferença entre os modelos: R$ 1,23/t no CH570 e R$ 0,62/t no CH950. Como ambos operam com um operador por turno, mas o CH950 colhe um volume diário muito maior, o custo fixo da mão de obra é diluído em uma produção bem superior, reduzindo seu peso por tonelada. Esse é o principal fator responsável pela vantagem de custo do modelo de duas linhas.

A depreciação foi ligeiramente maior no CH950 (R$ 1,29/t contra R$ 1,26/t no CH570), calculada pelo método linear com base no valor de aquisição descontado do valor residual e na vida útil estimada em horas. Embora o CH950 represente um investimento praticamente duas vezes maior, sua elevada produtividade dilui boa parte desse custo, de modo que a diferença na depreciação por tonelada foi pequena.

A soma dos componentes resultou em custo operacional total de R$ 8,24/t para o CH570 e R$ 7,66/t para o CH950, representando uma economia de R$ 0,58/t (≈ −7,0%) em favor do modelo de duas linhas. A vantagem decorre principalmente da diluição da mão de obra, parcialmente compensada pela depreciação um pouco mais elevada.

A direção do resultado converge com Silva e Folmann (2017), que, embora tenham encontrado custo horário R$ 35,22 maior para a colhedora de duas linhas, verificaram custo por

tonelada R$ 2,55 menor para essa configuração. A vantagem unitária observada no presente estudo foi de menor magnitude, possivelmente porque o consumo específico de combustível foi equivalente entre os modelos, enquanto Silva e Folmann (2017) também observaram economia de combustível por tonelada na máquina de duas linhas. Dessa forma, no presente estudo, a diferença de custo concentrou-se principalmente na diluição da mão de obra.

Bastos e Landell (2016) demonstraram que o custo do corte mecanizado é sensível à escala de produção, registrando redução de 27,9% no custo diante de aumento de 31,1% na produtividade agrícola. Esse comportamento corrobora o efeito de diluição dos custos por unidade produzida observado na comparação entre a CH570 e a CH950.

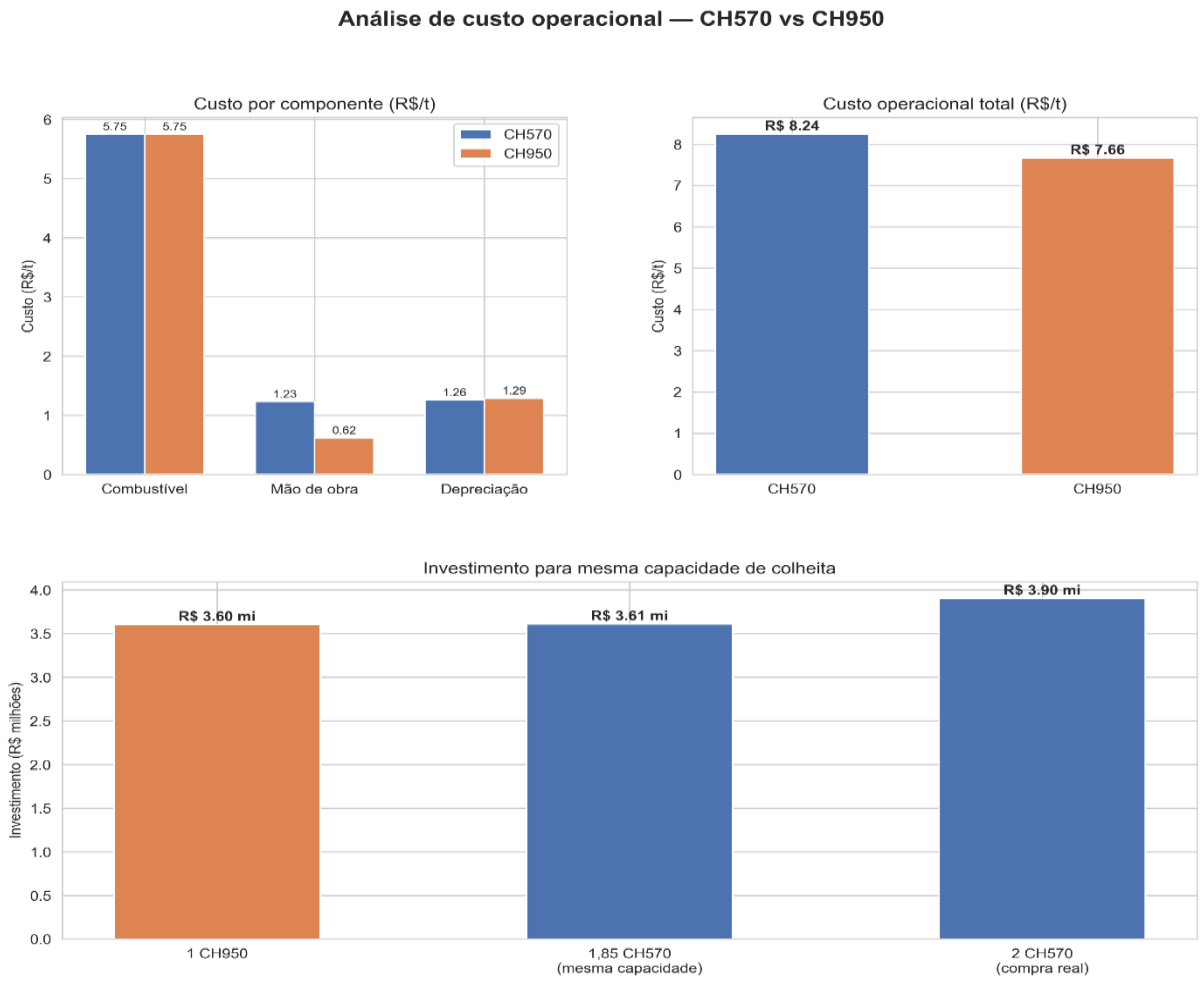


Figura 27. Análise de custo operacional: custo por componente, custo total e investimento para mesma capacidade de colheita (CH570 vs CH950).

Além do custo por tonelada, avaliou-se o investimento necessário para uma mesma capacidade de colheita. A partir da capacidade operacional em área, estimada pela relação entre a produção e a produtividade agrícola, verificou-se que o CH950 colhe aproximadamente 1,85 vezes a área de um CH570 no mesmo intervalo. Sob essa ótica, dois cenários de comparação

foram considerados. No primeiro, mantendo-se a mesma capacidade de colheita, um CH950 (R$ 3.600.000,00) equivale a cerca de 1,85 CH570 (R$ 3.607.500,00), resultando em investimento praticamente igual, mas com a vantagem de operar com menos máquinas e menos operadores. No segundo cenário, considerando a aquisição prática de duas unidades, um CH950 (R$ 3.600.000,00) representa investimento inferior ao de dois CH570 (R$ 3.900.000,00), com economia de R$ 300.000,00 na aquisição, ainda que dois CH570 ofereçam capacidade de colheita ligeiramente superior à de um CH950.

Os valores absolutos encontrados devem ser interpretados dentro das premissas do cenário determinístico adotado. Alterações na vida útil, no valor residual, no preço do combustível, nos custos trabalhistas ou na produtividade operacional modificariam os custos por tonelada. Além disso, a análise representa os componentes incluídos no estudo — combustível, mão de obra e depreciação — e não o custo integral de propriedade das máquinas, que também poderia abranger manutenção, reparos, lubrificantes, seguros e outros encargos.

4.6 Discussão integrada: produtividade, disponibilidade, qualidade da colheita e custos

A análise conjunta dos indicadores evidencia que a CH950 apresentou desempenho superior em toneladas colhidas e produtividade (Figuras 15 e 17), com diferenças estatisticamente significativas e tamanhos de efeito elevados, o que indica ganho operacional relevante no período avaliado. Em contrapartida, a disponibilidade foi maior na CH570 (Figura 21), sugerindo maior regularidade operacional e menor suscetibilidade a perdas de tempo por interrupções, aspecto associado à confiabilidade do processo de colheita.

Do ponto de vista das condições de colheita e do ambiente agrícola, a ausência de diferença significativa em produtividade agrícola e velocidade (Figuras 20 e 18) sustenta que os modelos foram comparados sob cenário globalmente semelhante quanto ao potencial produtivo do canavial e ao regime médio de condução, reduzindo a probabilidade de que o ganho observado na CH950 seja explicado apenas por variação de condição de campo. Adicionalmente, a equivalência do consumo específico (Figura 19) indica que o incremento de produção da CH950 não implicou penalidade energética por tonelada colhida no conjunto analisado.

Quanto aos indicadores de qualidade, perdas, pisoteio e abalamento não diferiram entre os modelos (Figuras 23, 24 e 25), sugerindo comportamento semelhante na maior parte dos componentes monitorados. Contudo, o arranquio foi superior na CH950 (Figura 26), o que merece atenção por estar associado à integridade da soqueira e à sustentabilidade agronômica

da operação ao longo dos ciclos de rebrota. Esse comportamento é, em certa medida, esperado para uma máquina de maior complexidade: ao colher duas linhas simultaneamente, a CH950 exige maior precisão no acompanhamento do perfil do solo e na regulagem do corte de base, de modo que pequenos desajustes podem se traduzir em maior incidência de arranquio. Trata-se, portanto, de um aspecto gerenciável por meio de regulagem adequada e condução operacional cuidadosa, e não de uma limitação intrínseca que comprometa o uso do modelo.

Sob a ótica econômica, a análise de custos reforça a vantagem operacional da CH950. O custo operacional total foi de R$ 8,24/t para a CH570 e R$ 7,66/t para a CH950, representando economia de R$ 0,58/t, aproximadamente 7,0%, em favor do modelo de duas linhas, decorrente principalmente da diluição da mão de obra em um volume colhido maior. Além disso, ao colher aproximadamente 1,85 vezes a área de uma CH570, a CH950 permite atender à mesma demanda de colheita com menos máquinas e operadores, com investimento equivalente ao de uma frota de CH570 de capacidade comparável.

O conjunto de resultados aponta para um equilíbrio típico da colheita mecanizada: a CH950 entrega maior capacidade produtiva e menor custo por tonelada, enquanto a CH570 apresenta maior regularidade por disponibilidade. Nesse contexto, a CH950 mostra-se especialmente indicada para operações de grande escala, em que a alta capacidade de colheita e a diluição de custos fixos são prioritárias, e em que a estrutura de manutenção consegue sustentar a disponibilidade do equipamento. Já a CH570 pode ser preferível em situações que exijam maior flexibilidade operacional, menor investimento inicial por unidade ou maior regularidade de disponibilidade. O controle do arranquio, por meio de regulagem e condução adequadas, permanece como o principal ponto de atenção para que o ganho de capacidade da CH950 não comprometa a preservação da soqueira.

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados permitem concluir que a configuração de duas linhas oferece vantagem operacional e econômica nas condições avaliadas.

A CH950 colheu maior volume, com produtividade significativamente superior e sem penalização no consumo de combustível por tonelada, demonstrando que seu ganho decorre da maior capacidade de processamento, e não de condições de campo ou de condução mais favoráveis.

A CH570 mostrou-se mais disponível mecanicamente.

A CH950 permite atender à mesma demanda com investimento equivalente e menor número de máquinas e operadores. Todavia, registrou maior arranquio, indicando que o aproveitamento de sua capacidade depende de manutenção estruturada e de regulagem cuidadosa do corte de base.

A CH950 é a opção mais indicada para operações de grande escala que priorizem capacidade e diluição de custos fixos e disponham de estrutura de manutenção adequada.

A CH570 permanece pertinente onde se valorizem flexibilidade, menor investimento por unidade e maior regularidade de disponibilidade.

Como continuidade, recomenda-se ampliar o período de avaliação para safras completas e investigar o efeito do arranquio e da compactação sobre a longevidade da soqueira ao longo dos ciclos de rebrota.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Levantamento de preços de combustíveis: série histórica**. Brasília: ANP, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrencia/precos/precos-revenda-e-de-distribuicao-combustiveis/serie-historica-do-levantamento-de-precos.

BASTOS, K. J. J. Z.; LANDELL, M. G. A. Influência da produtividade da cana-de-açúcar no custo do corte mecanizado. Revista iPecege, v. 2, n. 4, 2016. Disponível em: https://www.revista.ipecege.com/revista/article/view/86.

BRAUNBECK, O. A.; OLIVEIRA, J. T. A. Colheita de cana-de-açúcar com auxílio mecânico. Engenharia Agrícola, v. 26, n. 1, 2006. Disponível em: https://www.scielo.br/j/eagri/a/TWRDPKRhRCkPQHZpjs9VNJc/?lang=pt.

CARASKI, B. G.; MINGOTTE, F. L. C. Agricultura de precisão no cultivo de cana-de-açúcar. SIMTEC, 2015. Disponível em: https://simtec.fatectq.edu.br/simtec/article/view/246.

CARMO, C. R. S. et al. Perdas de cana-de-açúcar na colheita mecanizada. GETEC, v. 10, n. 27, 2021. Disponível em: https://revistas.fucamp.edu.br/index.php/getec/article/view/2523/1570.

CASSIA, M. T.; SILVA, R. P.; PAIXÃO, C. S. S.; BERTONHA, R. S.; CAVICHIOLI, F. A. Desgaste das facas do corte basal na qualidade da colheita mecanizada de cana-de-açúcar. Ciência Rural, v. 44, n. 6, 2014. Disponível em: https://www.scielo.br/j/cr/a/qnLSFn5sKmNvtnkbbBrt5Zq/?lang=pt&format=html.

COHEN, J. Statistical power analysis for the behavioral sciences. 2. ed. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates, 1988.

CORÁ, J. E.; ARAUJO, A. V.; PEREIRA, G. T.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 28, n. 6, 2004. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbcs/a/SV86BDt6v8GfBrzwfSPLbCq/?lang=pt.

DA ROSA, E. J. et al. Perdas visíveis de cana-de-açúcar em colheita mecanizada. EPCC - UNICESUMAR, 2009. Disponível em: https://www.unicesumar.edu.br/epcc-2009/wp-content/uploads/sites/77/2016/07/jeffersonvieirajose3.pdf.

DO NASCIMENTO, D. C. et al. A reliability engineering case study of sugarcane harvesters. Gestão & Produção, v. 27, n. 4, 2020. Disponível em: https://www.scielo.br/j/gp/a/5CYvLCqPF6PGsLGfBHKxxFg/?format=pdf.

FIGUEIREDO, I. C. et al. A qualidade da cana-de-açúcar como matéria-prima para produção de álcool. Revista Energia na Agricultura, v. 23, n. 1, 2008. Disponível em: https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4037531.pdf.

GARCIA, A. Colheita mecânica e manual da cana-de-açúcar: histórico e análise. Nucleus, v. 6, n. 2, 2009. Disponível em: https://www.academia.edu/download/91722472/268.pdf.

GIACHINI, C. F.; RAMOS, C. R. G.; LYRA, G. A. et al. Consumo de combustível e perdas de cana-de-açúcar durante a colheita diurna e noturna. Energia na Agricultura, v. 31, n. 1, 2016. Disponível em: http://revistas.fca.unesp.br/index.php/energia/article/view/864.

GREGO, C. R.; ARAUJO, L. S.; VICENTE, L. E. et al. Agricultura de precisão em cana-de-açúcar. In: BERNARDI, A. C. C. et al. (Ed.). Agricultura de Precisão: Resultados de um Novo Olhar. Brasília: Embrapa, 2014. Disponível em: https://www.bibliotecaagptea.org.br/agricultura/precisao/artigos/AGRICULTURA%20DE%20PRECISAO%20EM%20CANA%20DE%20ACUCAR.pdf.

HARRIS, C. R. et al. Array programming with NumPy. Nature, v. 585, n. 7825, p. 357–362, 2020. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41586-020-2649-2.

HUNTER, J. D. Matplotlib: a 2D graphics environment. Computing in Science & Engineering, v. 9, n. 3, p. 90–95, 2007. DOI: 10.1109/MCSE.2007.55.
INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Cidades e estados: Angélica – MS. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

JENSEN, T.; BAILLIE, C.; BRAMLEY, R. et al. Assessment of sugarcane yield monitoring technology for precision agriculture. Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists, v. 32, 2010. Disponível em: https://research.usq.edu.au/item/q07z3/assessment-of-sugarcane-yield-monitoring-technology-for-precision-agriculture.

KAEWKABTHONG, A. et al. Determination of field capacity for the sugarcane harvester using GNSS data. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, v. 301, n. 1, 2019. Disponível em: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/301/1/012016/pdf.

LANÇONI, A. A.; SOARES, W. M. et al. Efeito da aplicação de um sistema de automação agrícola em colheita mecanizada de cana-de-açúcar como ferramenta de gestão e controle de custo operacional. Ensaios e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde, v. 24, n. 3, 2020. Disponível em: https://ensaioseciencia.pgsskroton.com.br/article/view/8672.

LEVENE, H. Robust tests for equality of variances. In: OLKIN, I. et al. (Ed.). Contributions to probability and statistics: essays in honor of Harold Hotelling. Stanford: Stanford University Press, 1960. p. 278–292.

LIMNA, J. B.; KAMARAJ, P.; THAMBIDURAI, S.; THIYAGARAJAN, R.; SIVAKUMAR, S. D.; KATHIRAVAN, M. Review of mechanical sugarcane harvesters: performance, efficiency and crop suitability. Plant Science Today, v. 12, sp1, 2025. DOI: 10.14719/pst.6597. Disponível em: https://doi.org/10.14719/pst.6597.

LINHARES, M. et al. Eficiência e desempenho operacional de máquinas harvester e forwarder na colheita florestal. Pesquisa Agropecuária Tropical, v. 42, n. 4, 2012. Disponível em: https://www.scielo.br/j/pat/a/PWMQmnXPPG83BpcmJVMSSPK/.

LYRA, G. A. et al. Consumo de combustível de duas colhedoras de cana-de-açúcar em função da rotação do motor. Repositório UNESP, 2012. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/items/eba0818e-453a-446f-a1ed-52b3622f370c.

MA, S.; KARKEE, M.; SCHARF, P. A. et al. Sugarcane harvester technology: a critical overview. Applied Engineering in Agriculture, v. 30, n. 5, 2014. Disponível em: https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=45218.

MAGALHÃES, P. S. G.; BALDO, R. F. G.; CERRI, D. G. P. Sistema de sincronismo entre a colhedora de cana-de-açúcar e o veículo de transbordo. Engenharia Agrícola, v. 28, n. 2, 2008. Disponível em: https://www.scielo.br/j/eagri/a/5MXdtfDTkXHBN8TWJZkCHWM/.

MANHÃES, C. M. C. et al. Consumo operacional de combustível de uma colhedora de cana-de-açúcar. Vértices, v. 20, n. 2, 2018. Disponível em: https://editoraessentia.iff.edu.br/index.php/vertices/article/view/10011.

MANN, H. B.; WHITNEY, D. R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. The Annals of Mathematical Statistics, v. 18, n. 1, p. 50–60, 1947. DOI: 10.1214/aoms/1177730491.

MARTINS, M. B.; RAMOS, C. R. G. et al. Relação entre velocidade de deslocamento, rendimento da cana-de-açúcar e o consumo de combustível da colhedora. Revista de Agricultura Neotropical, v. 4, n. 1, p. 88-91, 2017. Disponível em: https://periodicosonline.uems.br/index.php/agrineo/article/download/1264/1298.

MASSIRER, V. R. Colheita de cana de alta produtividade: um desafio superável. Apresentação técnica. John Deere, 2023a.

MASSIRER, V. R. Manutenção em máquinas de duas linhas e a necessidade de disponibilidade operacional: como vencer esse desafio? Apresentação técnica. John Deere, 2023b.

MATHANKER, S. K. et al. Power requirements and field performance in harvesting energycane and sugarcane. Biomass and Bioenergy, v. 75, 2015. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953415000616.

MIALHE, L. G. Manual de mecanização agrícola. São Paulo: Agronômica Ceres, 1974.

NEVES, J. L. M.; MAGALHÃES, P. S. G.; MORAES, E. E. Avaliação de perdas invisíveis na colheita mecanizada em dois fluxos de massa de cana-de-açúcar. Engenharia Agrícola, v. 26, n. 3, 2006. DOI: 10.1590/S0100-69162006000300018. Disponível em: https://www.scielo.br/j/eagri/a/B4gXtnYx45QLjhTmwDnJPvC/?lang=pt.

NORONHA, R. H. F.; SILVA, R. P.; CHIODEROLI, C. A.; SANTOS, E. P. Controle estatístico aplicado ao processo de colheita mecanizada diurna e noturna de cana-de-açúcar. Bragantia, v. 70, n. 4, 2011. Disponível em: https://www.scielo.br/j/brag/a/qMYKNmnPsqy9kD4Fyv7fMbx/?format=html&lang=pt.

PANIAGO, A. L.; MILAN, M. Implantação do modelo de gestão enxuto em atividade de colheita mecanizada, transbordo e transporte de cana de açúcar. Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 2015. Disponível em: https://www.academia.edu/download/51170880/ArtigoArgelioPaniagoCONBEA2015_v4.pdf.

RAMOS, C. R. G.; LANÇAS, K. P. et al. Eficiência e demanda energética de uma colhedora de cana-de-açúcar em talhões de diferentes comprimentos. Energia na Agricultura, v. 31, n. 2, 2016a. Disponível em: http://revistas.fca.unesp.br/index.php/energia/article/view/2102.

RAMOS, C. R. G.; LANÇAS, K. P. et al. Perdas e impurezas na colheita mecanizada de cana-de-açúcar utilizando diferentes configurações de trabalho da colhedora. Energia na Agricultura, v. 31, n. 2, 2016b. Disponível em: http://revistas.fca.unesp.br/index.php/energia/article/view/2359.

REIS, G. N. Desempenho da colhedora de duas linhas. Apresentação técnica. UDOP, 5 jul. 2023.

REIS, G. N. A experiência consolidada da Adecoagro com 34 colhedoras de duas linhas. Apresentação técnica. IDEA, 2025.

RODRIGUES, E. B.; ABI SAAB, O. J. G. Avaliação técnico-econômica da colheita manual e mecanizada da cana-de-açúcar (Saccharum spp) na região de Bandeirantes–PR. Semina: Ciências Agrárias, v. 28, n. 4, 2007. Disponível em: https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/semagrarias/article/view/2889/2447.

RUNGMEKARAT, S. et al. Investigating Visible Cane Loss and Stump Damage Due to Mechanized Harvesting. International Journal of Agronomy, 2023. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2023/4759240.

SALVI, J. V. Qualidade do corte de base de colhedoras de cana-de-açúcar. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", USP, 2006. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11148/tde-07122006-142950/publico/JoseSalvi.pdf.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. Á. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAÚJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SEGATO, S. V. et al. Perdas visíveis na colheita mecanizada de cana-de-açúcar. Revista Energia na Agricultura, v. 26, n. 2, 2011. Disponível em: https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4039543.pdf.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). Biometrika, v. 52, n. 3-4, p. 591–611, 1965. DOI: 10.1093/biomet/52.3-4.591.

SILVA, M. L.; FOLMANN, W. T. Aspectos técnicos e custos entre colhedoras de cana-de-açúcar de uma e duas linhas. AGRIS FAO, 2017. Disponível em: https://agris.fao.org/search/en/providers/125490/records/67dab1a7677d8be0233b1134.

SOARES, C. C. S. P.; OKUNO, F. M.; DUFT, D. G. et al. Commercial sugarcane dry cleaning systems in Brazil: Progress and challenges. Bioenergy Research, v. 12, n. 3, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Paulo-Mantelatto/publication/335137707.

STUDENT. The probable error of a mean. Biometrika, v. 6, n. 1, p. 1–25, 1908. DOI: 10.1093/biomet/6.1.1.

TESTA, J. V. P.; LANÇAS, K. P.; MARTINS, M. B.; SANDI, J.; DRUDI, F. S. Desempenho operacional e energético de colhedoras de cana-de-açúcar (Saccharum spp.) para uma e duas linhas da cultura. Energia na Agricultura, v. 31, n. 3, p. 253-258, 2016. DOI: 10.17224/EnergAgric.2016v31n3p253-258. Disponível em: https://revistas.fca.unesp.br/index.php/energia/article/view/1922.

TESTA, J. V. P.; MARTINS, M. B.; MARQUES, A. C.; LANÇAS, K. P.; LUSTOSA SOBRINHO, R.; FINATTO, T.; OKLA, M.; ABDELGAWAD, H. Continuous and impact cutting in mechanized sugarcane harvest: quality, losses and impurities. Agriculture, v. 13, n. 7, art. 1329, 2023. DOI: 10.3390/agriculture13071329. Disponível em: https://www.mdpi.com/2077-0472/13/7/1329.

VIRTANEN, P. et al. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. Nature Methods, v. 17, n. 3, p. 261–272, 2020. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41592-019-0686-2.

WASKOM, M. L. Seaborn: statistical data visualization. Journal of Open Source Software, v. 6, n. 60, p. 3021, 2021. DOI: 10.21105/joss.03021.

WELCH, B. L. The generalization of "Student's" problem when several different population variances are involved. Biometrika, v. 34, n. 1-2, p. 28–35, 1947. DOI: 10.1093/biomet/34.1-2.28.

XAVIER, W. D. et al. Losses in the mechanized harvesting of sugarcane as a function of field slope and harvester speed. Australian Journal of Crop Science, v. 14, n. 4, p. 675-682, 2020. Disponível em: https://www.cropj.com/xavier1442020675_682.pdf.

ZAMYKAL, D.; EVERINGHAM, Y. L. Sugarcane and precision agriculture: quantifying variability is only half the story – a review. In: Climate Change, Intercropping, Pest Control and Beneficial Microorganisms. Springer, 2009. DOI: 10.1007/978-90-481-2716-0_9. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-90-481-2716-0_9.

ZEIN EL-DEN, A. M.; AHMED, S. F.; HANAFY, W. M. et al. Fabrication and test of a tractor-front-mounted two-row sugarcane harvester. Misr Journal of Agricultural Engineering, v. 37, n. 1, 2020. Disponível em: https://journals.ekb.eg/article_120927.html.

7. APÊNDICE A - CÓDIGO PYTHON UTILIZADO NO PROCESSAMENTO E NA ANÁLISE DOS DADOS

Neste apêndice é apresentado o código integral utilizado no processamento dos dados, na análise estatística, na geração das figuras e no cálculo dos custos operacionais.

```
Análise estatística comparativa entre colhedoras de cana-de-açúcar
CH570 (uma linha) e CH950 (duas linhas).

- Estatística descritiva (média, desvio-padrão amostral, mediana,
  mínimo, máximo, n e intervalo de confiança de 95%);
- Teste de normalidade (Shapiro-Wilk);
- Teste de homogeneidade de variâncias (Levene);
- Comparação entre modelos:
    * t de Student (normal e variâncias iguais),
    * t de Welch (normal e variâncias diferentes),
    * Mann-Whitney U (quando não há normalidade);
- Tamanho de efeito (d de Cohen) e diferença percentual;
- Figuras: histograma, boxplot e gráfico quantil-quantil (Q-Q plot).

Bibliotecas: NumPy, SciPy, Matplotlib e seaborn. Python 3.13.

import os
from pathlib import Path

import numpy as np
from scipy import stats
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns

sns.set_style("whitegrid")
plt.rcParams["font.family"] = ["Arial", "DejaVu Sans"]  # fonte reserva para o sinal −1
```

```
# ----------------------------------------------------------------------
# PASTA DE SAIDA DAS FIGURAS
# As imagens sao salvas NA MESMA PASTA onde este arquivo .py esta salvo.
# Assim funciona em qualquer computador, com ou sem OneDrive, e
# independentemente do idioma da area de trabalho.
# ----------------------------------------------------------------------
PASTA_SAIDA = Path(__file__).resolve().parent
print("="*70)
print(f"Pasta onde o arquivo .py esta: {PASTA_SAIDA}")
print(f"Diretorio de trabalho atual:  {os.getcwd()}")
print("="*70 + "\n")

# ----------------------------------------------------------------------
# 1. DADOS REAIS (4 máquinas x 4 meses = 16 observações por modelo)
# ----------------------------------------------------------------------
# Indicadores percentuais armazenados como fração: multiplicados por 100.
# Produtividade recalculada a partir dos totais (soma t / soma h).
# Consumo específico (L t⁻¹) utilizado conforme valor consolidado da base.

toneladas = {
   "CH570": [13123.3, 19164.3, 18832.2, 15996.3, 13111.0, 17751.9, 18283.3, 15724.6,
             13433.9, 20459.7, 16613.0, 14747.3, 16164.0, 18113.6, 19721.9, 15294.1],
   "CH950": [28171.7, 39904.9, 34889.3, 37038.0, 28853.2, 34342.0, 34775.9, 28982.8,
             24330.5, 39568.5, 35485.1, 39985.5, 23056.6, 34968.6, 31452.7, 39906.4],
}
horas = {
   "CH570": [268.985, 313.128, 327.497, 447.353, 252.519, 295.739, 316.843, 370.051,
             274.944, 322.420, 310.422, 407.298, 261.056, 279.115, 319.261, 391.597],
   "CH950": [351.106, 389.219, 373.908, 397.994, 324.233, 361.284, 359.497, 332.756,
             294.738, 386.330, 343.970, 347.048, 268.517, 378.342, 325.925, 380.612],
}
consumo_lt = {
   "CH570": [0.963, 0.741, 0.785, 1.078, 0.932, 0.764, 0.797, 1.081,
             0.959, 0.721, 0.863, 1.156, 0.820, 0.737, 0.765, 1.090],
```

```
    "CH950": [1.104, 0.829, 0.899, 0.903, 1.030, 0.918, 0.894, 1.016,
            1.135, 0.831, 0.843, 0.488, 1.082, 0.919, 0.891, 0.534],
}
produtividade_agricola = {
    "CH570": [62.7, 85.1, 67.3, 36.9, 62.7, 85.1, 67.3, 36.9,
            62.7, 85.1, 67.3, 36.9, 62.7, 85.1, 67.3, 36.9],
    "CH950": [55.4, 74.9, 44.7, 46.1, 55.4, 74.9, 44.7, 46.1,
            67.1, 70.4, 57.1, 72.7, 67.1, 70.4, 57.1, 72.7],
}
velocidade = {
    "CH570": [5.240, 4.459, 4.577, 5.304, 4.834, 4.332, 4.534, 5.633,
            4.817, 4.272, 4.590, 5.447, 4.839, 4.470, 4.709, 5.640],
    "CH950": [4.749, 4.164, 5.893, 4.692, 4.574, 4.177, 5.803, 4.548,
            4.172, 4.576, 4.807, 4.551, 4.063, 4.502, 4.697, 4.402],
}
disponibilidade = {
    "CH570": [0.987, 0.979, 0.989, 0.951, 0.981, 0.958, 0.964, 0.930,
            0.987, 0.968, 0.962, 0.947, 0.991, 0.989, 0.987, 0.931],
    "CH950": [0.920, 0.943, 0.882, 0.899, 0.970, 0.902, 0.925, 0.873,
            0.956, 0.948, 0.948, 0.883, 0.954, 0.955, 0.912, 0.919],
}
eficiencia_operacional = {
    "CH570": [0.568, 0.601, 0.591, 0.735, 0.553, 0.601, 0.591, 0.617,
            0.562, 0.601, 0.591, 0.668, 0.534, 0.601, 0.591, 0.654],
    "CH950": [0.647, 0.649, 0.623, 0.679, 0.625, 0.649, 0.623, 0.663,
            0.560, 0.658, 0.642, 0.620, 0.542, 0.658, 0.642, 0.642],
}
perdas = {
    "CH570": [0.016, 0.011, 0.049, 0.011, 0.011, 0.013, 0.016, 0.010,
            0.012, 0.013, 0.017, 0.010, 0.013, 0.013, 0.013, 0.011],
    "CH950": [0.015, 0.018, 0.011, 0.010, 0.016, 0.020, 0.010, 0.013,
            0.012, 0.013, 0.020, 0.009, 0.018, 0.013, 0.020, 0.010],
}
pisoteio = {
```

```
    "CH570": [0.250, 0.014, 0.000, 0.000, 0.033, 0.000, 0.065, 0.001,
              0.044, 0.000, 0.000, 0.002, 0.000, 0.000, 0.025, 0.002],
    "CH950": [0.000, 0.035, 0.000, 0.000, 0.006, 0.000, 0.001, 0.000,
              0.042, 0.013, 0.063, 0.065, 0.027, 0.013, 0.007, 0.100],
}
abalamento = {
    "CH570": [0.000, 0.008, 0.000, 0.003, 0.010, 0.007, 0.003, 0.022,
              0.027, 0.007, 0.003, 0.006, 0.010, 0.004, 0.003, 0.004],
    "CH950": [0.012, 0.003, 0.003, 0.006, 0.015, 0.005, 0.004, 0.009,
              0.006, 0.019, 0.005, 0.005, 0.006, 0.018, 0.005, 0.008],
}
arranquio = {
    "CH570": [0.000, 0.005, 0.000, 0.002, 0.013, 0.004, 0.004, 0.005,
              0.040, 0.007, 0.003, 0.003, 0.013, 0.002, 0.002, 0.003],
    "CH950": [0.018, 0.007, 0.008, 0.007, 0.013, 0.016, 0.005, 0.012,
              0.003, 0.019, 0.005, 0.004, 0.002, 0.019, 0.002, 0.008],
}

# Produtividade recalculada a partir dos totais consolidados (soma t / soma h)
produtividade = {
    "CH570": [t / h for t, h in zip(toneladas["CH570"], horas["CH570"])],
    "CH950": [t / h for t, h in zip(toneladas["CH950"], horas["CH950"])],
}

# Conjunto de variáveis analisadas (nome de exibição, dados, unidade, é_percentual)
variaveis = [
    ("Toneladas colhidas", toneladas, "t", False),
    ("Horas trabalhadas", horas, "h", False),
    ("Produtividade operacional", produtividade, "t h⁻¹", False),
    ("Consumo específico", consumo_lt, "L t⁻¹", False),
    ("Produtividade agrícola", produtividade_agricola, "t ha⁻¹", False),
    ("Velocidade", velocidade, "km h⁻¹", False),
    ("Disponibilidade mecânica", disponibilidade, "%", True),
    ("Eficiência operacional", eficiencia_operacional, "%", True),
```

```
    ("Perdas", perdas, "%", True),
    ("Pisoteio", pisoteio, "%", True),
    ("Abalamento", abalamento, "%", True),
    ("Arranquio", arranquio, "%", True),
]

ALFA = 0.05


# ---------------------------------------------------------------------
# 2. FUNÇÕES ESTATÍSTICAS
# ---------------------------------------------------------------------
def intervalo_confianca(x, conf=0.95):
    """Intervalo de confiança para a média (distribuição t)."""
    n = len(x)
    media = np.mean(x)
    erro = stats.sem(x)
    margem = erro * stats.t.ppf((1 + conf) / 2.0, n - 1)
    return media - margem, media + margem


def cohen_d(a, b):
    """Tamanho de efeito d de Cohen (desvio-padrão combinado)."""
    na, nb = len(a), len(b)
    va, vb = np.var(a, ddof=1), np.var(b, ddof=1)
    sp = np.sqrt(((na - 1) * va + (nb - 1) * vb) / (na + nb - 2))
    return (np.mean(a) - np.mean(b)) / sp if sp > 0 else 0.0


def classifica_efeito(d):
    d = abs(d)
    if d < 0.2:
        return "insignificante"
    elif d < 0.5:
```

```
        return "pequeno"
    elif d < 0.8:
        return "médio"
    else:
        return "grande"


def descritiva(x):
    return {
        "n": len(x),
        "media": np.mean(x),
        "desvio": np.std(x, ddof=1),
        "mediana": np.median(x),
        "minimo": np.min(x),
        "maximo": np.max(x),
        "ic95": intervalo_confianca(x),
    }


def analisar(nome, dados, unidade, percentual):
    a = np.array(dados["CH570"], dtype=float)
    b = np.array(dados["CH950"], dtype=float)
    if percentual:
        a = a * 100.0
        b = b * 100.0

    desc570 = descritiva(a)
    desc950 = descritiva(b)

    # Normalidade (Shapiro-Wilk)
    p_norm570 = stats.shapiro(a).pvalue
    p_norm950 = stats.shapiro(b).pvalue
    normal = (p_norm570 > ALFA) and (p_norm950 > ALFA)
```

```
# Homogeneidade de variâncias (Levene)
p_levene = stats.levene(a, b).pvalue
variancias_iguais = p_levene > ALFA

# Escolha do teste
if normal:
    if variancias_iguais:
        teste = "t de Student"
        estat, p_valor = stats.ttest_ind(a, b, equal_var=True)
    else:
        teste = "t de Welch"
        estat, p_valor = stats.ttest_ind(a, b, equal_var=False)
else:
    teste = "Mann-Whitney U"
    estat, p_valor = stats.mannwhitneyu(a, b, alternative="two-sided")

d = cohen_d(a, b)
if np.mean(a) != 0:
    dif_pct = (np.mean(b) - np.mean(a)) / np.mean(a) * 100.0
else:
    dif_pct = float("nan")

significativo = p_valor < ALFA

return {
    "nome": nome, "unidade": unidade,
    "desc570": desc570, "desc950": desc950,
    "p_norm570": p_norm570, "p_norm950": p_norm950, "normal": normal,
    "p_levene": p_levene, "variancias_iguais": variancias_iguais,
    "teste": teste, "p_valor": p_valor,
    "cohen_d": d, "efeito": classifica_efeito(d),
    "dif_pct": dif_pct, "significativo": significativo,
    "dados_a": a, "dados_b": b,
}
```

```
def imprime_resultado(r):
    print("=" * 70)
    print(f"VARIÁVEL: {r['nome']} ({r['unidade']})")
    print("-" * 70)
    for modelo, d in [("CH570", r["desc570"]), ("CH950", r["desc950"])]:
        ic = d["ic95"]
        print(f"  {modelo}: n={d['n']} | média={d['media']:.3f} | dp={d['desvio']:.3f} | "
              f"mediana={d['mediana']:.3f} | mín={d['minimo']:.3f} | máx={d['maximo']:.3f}")
        print(f"         IC95% = [{ic[0]:.3f}; {ic[1]:.3f}]")
    print(f"  Shapiro-Wilk: p(CH570)={r['p_norm570']:.4f} | p(CH950)={r['p_norm950']:.4f} "
          f"=> {'normal' if r['normal'] else 'não-normal'}")
    print(f"  Levene: p={r['p_levene']:.4f} => variâncias "
          f"{'iguais' if r['variancias_iguais'] else 'diferentes'}")
    print(f"  Teste aplicado: {r['teste']} | p-valor={r['p_valor']:.4f} "
          f"=> {'SIGNIFICATIVO' if r['significativo'] else 'não significativo'}")
    print(f"  d de Cohen={r['cohen_d']:.3f} ({r['efeito']}) | "
          f"diferença={r['dif_pct']:+.1f}%")


def gerar_figuras(r):
    """Histograma e boxplot lado a lado; Q-Q plot centralizado abaixo."""
    a, b = r["dados_a"], r["dados_b"]
    fig = plt.figure(figsize=(11, 9))
    gs = fig.add_gridspec(2, 2, height_ratios=[1, 1], hspace=0.3, wspace=0.25)
    fig.suptitle(f"{r['nome']} ({r['unidade']})", fontsize=14, fontweight="bold")

    # Histograma (cima esquerda)
    ax_hist = fig.add_subplot(gs[0, 0])
    ax_hist.hist(a, bins=6, alpha=0.6, label="CH570", color="#4C72B0", edgecolor="white")
    ax_hist.hist(b, bins=6, alpha=0.6, label="CH950", color="#DD8452", edgecolor="white")
    ax_hist.set_title("Histograma"); ax_hist.set_ylabel("Frequência")
    ax_hist.legend()
```

```
    # Boxplot (cima direita)
    ax_box = fig.add_subplot(gs[0, 1])
    ax_box.boxplot([a, b], tick_labels=["CH570", "CH950"])
    ax_box.set_title("Boxplot"); ax_box.set_ylabel(r["unidade"])

    # Q-Q plot dos dois modelos (centralizado embaixo, ocupando as duas colunas)
    ax_qq = fig.add_subplot(gs[1, :])
    for amostra, cor, rotulo in [(a, "#4C72B0", "CH570"), (b, "#DD8452", "CH950")]:
        (osm, osr), (decl, interc, _) = stats.probplot(amostra, dist="norm")
        ax_qq.scatter(osm, osr, color=cor, label=rotulo, s=25, alpha=0.7)
        ax_qq.plot(osm, decl * osm + interc, color=cor, linewidth=1)
    ax_qq.set_title("Q-Q plot")
    ax_qq.set_xlabel("Quantis teóricos")
    ax_qq.set_ylabel("Valores ordenados")
    ax_qq.legend()

    plt.tight_layout(rect=[0, 0, 1, 0.98])
    nome_arq = r["nome"].lower().replace(" ", "_").replace("ç", "c").replace("ã", "a")
    caminho = PASTA_SAIDA / f"figura_{nome_arq}.png"
    plt.savefig(caminho, dpi=300, bbox_inches="tight")
    plt.close()
    print(f"  >> Figura salva em: {caminho}")


# ---------------------------------------------------------------------
# 3. ANÁLISE DE CUSTO OPERACIONAL (determinística)
# ---------------------------------------------------------------------
def analise_custos():
    # Premissas
    preco_diesel = 6.46          # R$/L (ANP, MS, jun/2025)
    salario_base = 3200.00       # R$/mês
    fator_encargos = 1.62
    turnos_mes = 27.5            # 220 h / 8 h
```

```
beneficios_turno = 35.00     # R$/turno
turnos_dia = 3               # turnos diários por máquina
dias_mes = 30
valor = {"CH570": 1950000.00, "CH950": 3600000.00}
valor_residual_pct = 0.25    # 25% do valor de aquisição
vida_util_horas = 22000      # parâmetro adotado pelo autor

# Custo de mão de obra por turno (estimado)
custo_turno = (salario_base * fator_encargos) / turnos_mes + beneficios_turno
custo_dia = turnos_dia * custo_turno

# Produtividade média por modelo (t h⁻¹), para a depreciacao por tonelada
prod_media = {m: np.mean(produtividade[m]) for m in ["CH570", "CH950"]}

# Custos por maquina/mes, consolidados pela media do modelo.
# Combustivel: consumo especifico x preco diesel.
# Mao de obra: custo diario / producao diaria.
# Depreciacao: (valor - residual) / vida util em horas / produtividade.
resultados = {}
for modelo in ["CH570", "CH950"]:
    c_mo = []
    base_depreciavel = valor[modelo] * (1 - valor_residual_pct)
    dep_horaria = base_depreciavel / vida_util_horas
    dep_t = dep_horaria / prod_media[modelo]
    for i, ton_mes in enumerate(toneladas[modelo]):
        ton_dia = ton_mes / dias_mes
        c_mo.append(custo_dia / ton_dia)
    # combustivel: consumo especifico medio arredondado a 2 casas x preco
    ce_medio = round(np.mean(consumo_lt[modelo]), 2)
    comb_medio = ce_medio * preco_diesel
    resultados[modelo] = {
        "custo_comb": comb_medio, "custo_mo": np.mean(c_mo),
        "custo_dep": dep_t,
        "custo_total": comb_medio + np.mean(c_mo) + dep_t,
```

```
    }

print("\n" + "=" * 70)
print("ANALISE DE CUSTO OPERACIONAL (R$/t)")
print("-" * 70)
print(f"  Custo de mao de obra por turno estimado: R$ {custo_turno:.2f}")
print(f"  Custo de mao de obra por dia (3 turnos): R$ {custo_dia:.2f}")
print(f"{'Componente':<22}{'CH570':>12}{'CH950':>12}")
for comp, rotulo in [("custo_comb", "Combustivel"), ("custo_mo", "Mao de obra"),
                     ("custo_dep", "Depreciacao"), ("custo_total", "TOTAL")]:
    print(f"
{rotulo:<20}{resultados['CH570'][comp]:>12.2f}{resultados['CH950'][comp]:>12.2f}")
dif = resultados["CH950"]["custo_total"] - resultados["CH570"]["custo_total"]
print(f"  Diferenca CH950 - CH570: R$ {dif:.2f}/t
({dif/resultados['CH570']['custo_total']*100:+.1f}%)")

# ------------------------------------------------------------------
# FIGURA DE CUSTOS (tres paineis, mesmo layout dos indicadores):
# custo por componente e custo total lado a lado; substituicao
# de frota centralizada abaixo.
# ------------------------------------------------------------------
fig = plt.figure(figsize=(13, 11))
gs = fig.add_gridspec(2, 2, hspace=0.3, wspace=0.25)
fig.suptitle("Análise de custo operacional — CH570 vs CH950",
             fontsize=15, fontweight="bold")

# Painel 1: custo por componente
ax1 = fig.add_subplot(gs[0, 0])
comps = ["Combustível", "Mão de obra", "Depreciação"]
v570 = [resultados["CH570"][k] for k in ["custo_comb", "custo_mo", "custo_dep"]]
v950 = [resultados["CH950"][k] for k in ["custo_comb", "custo_mo", "custo_dep"]]
x = np.arange(len(comps)); w = 0.35
b1 = ax1.bar(x - w / 2, v570, w, label="CH570", color="#4C72B0")
b2 = ax1.bar(x + w / 2, v950, w, label="CH950", color="#DD8452")
```

```
ax1.set_ylabel("Custo (R$/t)"); ax1.set_title("Custo por componente (R$/t)")
ax1.set_xticks(x); ax1.set_xticklabels(comps); ax1.legend()
for bs in (b1, b2):
    for b in bs:
        ax1.annotate(f"{b.get_height():.2f}",
                     (b.get_x() + b.get_width() / 2, b.get_height()),
                     xytext=(0, 3), textcoords="offset points", ha="center", fontsize=8)

# Painel 2: custo total
ax2 = fig.add_subplot(gs[0, 1])
tot = [resultados["CH570"]["custo_total"], resultados["CH950"]["custo_total"]]
barras = ax2.bar(["CH570", "CH950"], tot, color=["#4C72B0", "#DD8452"], width=0.5)
ax2.set_ylabel("Custo (R$/t)"); ax2.set_title("Custo operacional total (R$/t)")
for bar in barras:
    ax2.annotate(f"R$ {bar.get_height():.2f}",
                 (bar.get_x() + bar.get_width() / 2, bar.get_height()),
                 xytext=(0, 3), textcoords="offset points",
                 ha="center", fontweight="bold", fontsize=10)

# Painel 3: investimento para mesma capacidade (substituicao de frota)
ax3 = fig.add_subplot(gs[1, :])
razao_cap = 1.85  # 1 CH950 equivale a ~1,85 CH570 em capacidade de area
inv_milhoes = [valor["CH950"] / 1e6,
               razao_cap * valor["CH570"] / 1e6,
               2 * valor["CH570"] / 1e6]
rotulos = ["1 CH950", "1,85 CH570\n(mesma capacidade)", "2 CH570\n(compra real)"]
cores = ["#DD8452", "#4C72B0", "#4C72B0"]
barras3 = ax3.bar(rotulos, inv_milhoes, color=cores, width=0.5)
ax3.set_ylabel("Investimento (R$ milhões)")
ax3.set_title("Investimento para mesma capacidade de colheita")
for bar in barras3:
    ax3.annotate(f"R$ {bar.get_height():.2f} mi",
                 (bar.get_x() + bar.get_width() / 2, bar.get_height()),
                 xytext=(0, 3), textcoords="offset points",
```

```
                ha="center", fontweight="bold", fontsize=10)

    plt.tight_layout(rect=[0, 0, 1, 0.98])
    caminho = PASTA_SAIDA / "figura_custo_operacional.png"
    plt.savefig(caminho, dpi=300, bbox_inches="tight")
    plt.close()
    print(f"  >> Figura salva em: {caminho}")

    return resultados


# ---------------------------------------------------------------------
# 4. EXECUÇÃO
# ---------------------------------------------------------------------
if __name__ == "__main__":
    print("ANÁLISE ESTATÍSTICA COMPARATIVA: CH570 vs CH950")
    print("n = 16 observações por modelo (4 máquinas x 4 meses)\n")

    for nome, dados, unidade, percentual in variaveis:
        r = analisar(nome, dados, unidade, percentual)
        imprime_resultado(r)
        gerar_figuras(r)

    analise_custos()
    print("\nFiguras salvas (histograma, boxplot e Q-Q plot por variável).")
```