

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CHARLES GODOI ERMELINDO PEREIRA

AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE HASTE DUPLA EM
ESCAVADEIRAS FLORESTAIS

**EVALUATION OF THE FEASIBILITY OF USING DUAL SHANKS IN FORESTRY
EXCAVATORS**

IPATINGA – MG

2025

CHARLES GODOI ERMELINDO PEREIRA

AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE HASTE DUPLA EM
ESCAVADEIRAS FLORESTAIS

Relatório técnico-científico apresentado ao Curso MBA Gestão Florestal da Universidade Federal do Paraná, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de MBA.

Orientador (a): Dr. Erwin Hugo Ressel Filho.

IPATINGA – MG

2025

RESUMO

A viabilidade dos empreendimentos florestais depende de fatores ambientais, sociais e econômicos, exigindo soluções que aumentem a rentabilidade, otimizem a mão de obra e assegurem a conservação do solo. Nesse contexto, este estudo avalia a utilização de haste dupla em escavadeiras hidráulicas para preparo de solo em áreas declivosas, fundamentando-se em pesquisas que destacam a influência da umidade na qualidade estrutural (Collet et al., 2024), os impactos da compactação e do índice de qualidade dos torrões (Cunha et al., 2020) e a relação entre declividade e desempenho operacional (Hall, 1995). O teste comparativo foi realizado entre duas escavadeiras Komatsu PC 210 LC, uma equipada com haste única e outra com haste dupla, ambas com sistema de adubação integrado, em áreas de plantio e reforma com declividades entre 18° e 35°, localizadas nas regiões de Ipaba e Belo Oriente, no período de 01/05/2025 a 31/10/2025.

A análise contemplou indicadores de produção, rendimento, eficiência operacional, disponibilidade mecânica, consumo de combustível e qualidade do preparo do solo (profundidade, estrondamento e distância entre linhas). Os resultados demonstraram que a haste dupla apresentou incremento de aproximadamente 20% na produção total, maior faixa de solo revolvida e melhor desagregação, porém com menor eficiência operacional e maior consumo de combustível (12,4% superior à haste única). A disponibilidade mecânica foi maior na haste dupla, enquanto a conformidade dos parâmetros de qualidade manteve-se dentro dos padrões aceitáveis, embora com necessidade de ajustes para uniformidade.

O estudo também identificou desafios operacionais, como presença de tocos acima de 40 cm, resíduos pós-colheita e pós-roçada, operação em áreas fragmentadas e diferença de subsolagem entre hastes. Esses fatores reforçam a importância do planejamento prévio e da adequação das áreas para garantir maior eficiência e segurança. Conclui-se que a utilização da haste dupla é tecnicamente viável, apresentando ganhos em produtividade e qualidade do solo, mas requer ajustes operacionais e análise econômica para adoção em larga escala.

Palavras-chave: haste dupla; escavadeira florestal; subsolagem; eficiência operacional; consumo de combustível; qualidade do solo; disponibilidade mecânica; produtividade; viabilidade técnica.

ABSTRACT

The viability of forest enterprises depends on environmental, social, and economic factors, requiring solutions that enhance profitability, optimize labor use, and ensure soil conservation. In this context, this study evaluates the technical feasibility of using a dual-shank system on hydraulic excavators for soil preparation in sloped areas, based on research highlighting the influence of soil moisture on structural quality (Collet et al., 2024), the impacts of compaction and clod quality index (Cunha et al., 2020), and the relationship between slope and operational performance (Hall, 1995). A comparative test was conducted between two Komatsu PC 210 LC excavators—one equipped with a single shank and the other with a dual-shank system, both featuring integrated fertilization—in planting and reforestation areas with slopes ranging from 18° to 35°, located in Ipaba and Belo Oriente, from May 1 to October 31, 2025.

The analysis included indicators of production, yield, operational efficiency, mechanical availability, fuel consumption, and soil preparation quality (depth, shattering, and spacing between rows). Results showed that the dual-shank system achieved approximately 20% higher total production, a wider disturbed soil band, and better fragmentation, but with lower operational efficiency and 12.4% higher fuel consumption compared to the single shank. Mechanical availability was greater with the dual-shank system, while quality parameters remained within acceptable standards, although adjustments are needed for uniformity.

Operational challenges were also identified, such as stumps over 40 cm, post-harvest and post-mowing residues, fragmented areas, and uneven subsoiling between shanks. These factors emphasize the importance of prior planning and site preparation to ensure greater efficiency and safety. The findings indicate that the dual-shank system is technically feasible, offering gains in productivity and soil quality, but requires operational adjustments and economic analysis for large-scale adoption.

Keywords: double shank; forestry excavator; subsoiling; operational efficiency; fuel consumption; soil quality; mechanical availability; productivity; technical feasibility.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
2 MATERIAL E MÉTODOS	7
2.1 Equipamentos e Ferramentas	7
2.2 Equipamentos / Materiais Utilizados na Coleta de Dados:	8
2.3 Planejamento para Subsolagem	8
2.4 Subsolagem	9
2.4.1 Parâmetros de Avaliação	10
2.4.2 Análise Estatística	10
2.4.2.1 Resultados dos Testes T	11
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	11
3.1 Produção	11
3.2 Rendimento	12
3.3 Eficiência Operacional	13
3.4 Disponibilidade Mecânica	14
3.5 Consumo de Combustível	15
3.6 QUALIDADE DO PREPARO DO SOLO	17
3.6.1 Profundidade	17
3.6.2 Estrondamento	17
3.6.3 Distância Entre Linhas	18
3.6.4 Comparativo Geral Entre Configurações	19
3.7 Dificuldades Operacionais	21
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	22
4.1 Limitações do Estudo	23
5. REFERÊNCIAS	25

1 INTRODUÇÃO

A subsolagem é uma prática essencial para o preparo do solo em áreas de plantio florestal, pois melhora a estrutura física, aumenta a infiltração de água e reduz a compactação, garantindo condições adequadas para o desenvolvimento radicular. A eficiência dessa operação está diretamente relacionada à tecnologia empregada, ao tipo de equipamento utilizado e às condições do terreno. Estudos indicam que escavadeiras hidráulicas apresentam maior capacidade de operação em áreas declivosas, superando as limitações dos tratores, embora com menor produtividade e maior custo por hectare (Hall, 1995). Além disso, pesquisas recentes demonstram que a umidade do solo influencia diretamente a qualidade estrutural após o preparo: operações realizadas em solo seco tendem a gerar maior formação de torrões e inconformidades no sulco, enquanto em solo úmido há melhor destorroamento e maior área mobilizada (Cunha et al., 2020; Collet et al., 2024). Esses fatores reforçam a importância da escolha da janela ideal de umidade e de ajustes operacionais para garantir eficiência e qualidade.

Com o objetivo de avaliar alternativas que possam aumentar a produtividade e otimizar recursos, a CENIBRA realizou um estudo comparativo entre duas escavadeiras hidráulicas Komatsu PC 210 LC, sendo uma equipada com haste subsoladora única (650 kg) e outra adaptada com haste dupla (1700 kg), ambas com sistema de adubação integrado. O teste foi conduzido entre maio e outubro de 2025, em áreas de plantio e reforma com declividades variando entre 18° e 35°, localizadas nas regiões de Ipaba e Belo Oriente.

A análise contemplou indicadores de desempenho como produção, rendimento, eficiência operacional, disponibilidade mecânica, consumo de combustível e qualidade do preparo do solo (profundidade, estrondamento e espaçamento entre linhas), conforme padrões normativos da empresa. Além disso, foram registradas dificuldades operacionais, como presença de tocos altos, resíduos pós-colheita, resíduos pós-roçada de brotação, operação em áreas fragmentadas e ajustes necessários na configuração de haste dupla. Este relatório apresenta os resultados obtidos, discutindo a viabilidade técnica da utilização da haste dupla, seus impactos na operação florestal e as implicações para planejamento e análise econômica.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Equipamentos e Ferramentas

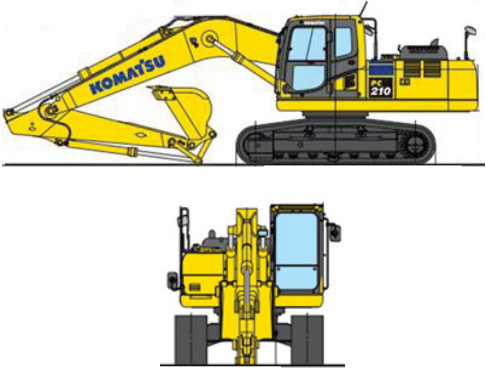
O sistema desenvolvido pela CENIBRA, consiste em uma escavadeira hidráulica Komatsu PC210 LC, adaptada com uma haste subsoladora na ponta do braço hidráulico, substituindo o conjunto original com caçamba. Essa adaptação permite a realização de sulcos e subsolagem do terreno para plantio.

Foram avaliadas duas configurações:

- Haste única com sistema de adubação integrado.
- Haste dupla com sistema de adubação integrado.


As Figuras 1, 2, 3 e 4 ilustram os equipamentos utilizados no teste.

Figura 1 – escavadeira Komatsu PC210 LC

<p>Escavadeira Komatsu modelo PC210 LC</p> <ul style="list-style-type: none"> • Motor Komatsu modelo: SAA6D107E • Potência nominal: 167hp. • Força Máxima na Barra de Tração: 178 kN • Comprimento do braço: 9550 mm • Velocidade baixa: 3 km/h • Velocidade alta: 5,5 km/h • Pressão solo: 0,36 kg/cm³ • Força de escavação: 178 kN 	
---	---


Fonte: Komatsu. Manual de Operação e Manutenção – Escavadeira Hidráulica PC210 LC. Komatsu Ltd.,2024

Figura 2 – haste subsoladora única

<p>Haste Subsoladora:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Acoplada à ponta da lança. • Articulado através do cilindro da caçamba (versão original). • Altura máxima: 100 cm. • Asa de andorinha: 20 cm 	
---	--

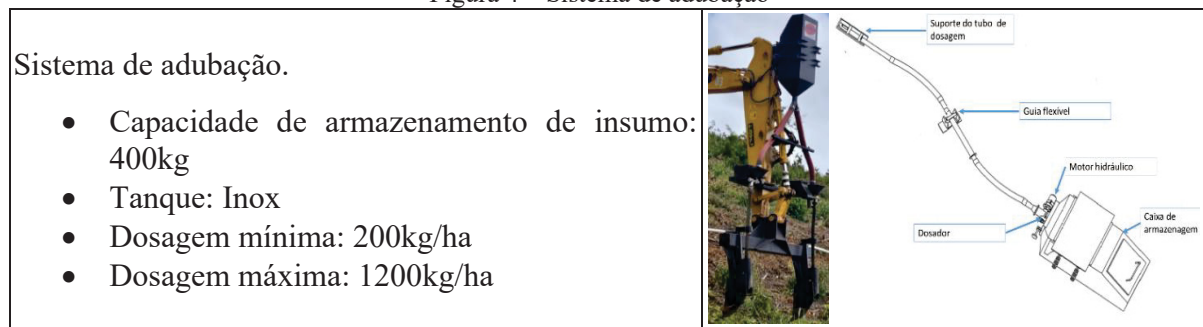
Fonte: Imagem produzida pelo autor durante atividades de campo – Cenibra, Belo Oriente, 2025.

Figura 3 – Haste subsoladora dupla

<p>Haste Subsoladora dupla:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Acoplada à ponta da lança. • Articulado através do cilindro da caçamba (versão original). • Altura máxima: 100 cm. • Asa de andorinha: 20 cm 	
---	--

Fonte: Imagem produzida pelo autor durante atividades de campo – Cenibra, Belo Oriente, 2025.

Figura 4 – Sistema de adubação



Fonte: Imagem produzida pelo autor durante atividades de campo – Cenibra, Belo Oriente, 2025.

2.2 Equipamentos / Materiais Utilizados na Coleta de Dados:

- Clinômetros e hipsômetros digitais Haglof – usado na medição de inclinação do terreno.
- Cronômetro Vollo, modelo VL 510.
- Rádio Portátil Motorola, modelo EP 450.
- Celular para fotos
- Trena métrica de 30 metros.
- Gabarito metálico em “T”.

2.3 Planejamento para Subsolação

O planejamento foi realizado conforme as diretrizes do plano de manejo, garantindo eficiência e segurança na execução. O supervisor de silvicultura, de posse das informações das áreas a serem reformadas ou implantadas, procedeu à delimitação das áreas conforme o relevo, utilizando mapas de microplanejamento como referência para programação e execução da atividade (Figura 5).

As áreas destinadas à subsolação com escavadeira foram aquelas com declividade entre 18° e 35°, faixa operacional definida pela política da empresa para este tipo de equipamento. A profundidade recomendada foi de 40 cm em áreas de encosta, visando reduzir a resistência à penetração radicular, melhorar a estrutura física do solo, aumentar a infiltração de água e minimizar a compactação, conforme práticas indicadas por Cunha et al. (2020) e Rolf (1994).

Para a escolha das áreas, utilizou-se inicialmente o mapa de microplanejamento da silvicultura, complementado por informações sobre presença de tocos, resíduos pós-colheita e condições de umidade, fatores que influenciam diretamente a qualidade do preparo e o índice de qualidade dos torrões (Collet et al., 2024; Cunha et al., 2020). A definição da janela de operação considerou a umidade do solo dentro da faixa friável, conforme recomendações de Dexter & Bird (2001), para garantir maior eficiência e menor ocorrência de torrões.

Além disso, o planejamento contemplou medidas para mitigar riscos operacionais, como ajustes na configuração da haste dupla em áreas fragmentadas e avaliação prévia de obstáculos (tocos acima de 40 cm), assegurando conformidade com os parâmetros normativos da empresa (profundidade, estrondamento e espaçamento entre linhas) e maior segurança na execução.

Figura 5 – Microplanejamento preparo de solo



Fonte: Imagem produzida pelo autor a partir de dados internos – Cenibra, Belo Oriente, 2025

2.4 Subsologem

A subsologem é classificada como uma operação de mobilização profunda do solo, com o objetivo de descompactá-lo, melhorar a estrutura física, aumentar a infiltração de água e favorecer o desenvolvimento radicular em profundidade. Essa prática é essencial para reduzir os efeitos da compactação, que podem limitar a penetração das raízes e a movimentação de água no perfil do solo (Rolf, 1994; Cunha et al., 2020).

A operação foi realizada com haste subsoladora acoplada ao braço hidráulico da escavadeira, no sentido transversal à declividade, garantindo sulcamento com profundidade mínima de 40 cm, conforme recomendações técnicas para melhoria da estrutura física e redução da resistência à penetração radicular (Cunha et al., 2020; Rolf, 1994). Foram utilizadas duas configurações de implemento: haste única (650 kg) e haste dupla (1700 kg), ambas com sistema de adubação integrado.

O controle de qualidade considerou os parâmetros normativos da empresa: profundidade, estrondamento (largura do sulco) e espaçamento entre linhas (2,50 m), aferidos com gabarito graduado e perfilômetro. A execução priorizou janelas de umidade dentro da faixa friável para minimizar a formação de torrões e garantir maior uniformidade do sulco (Dexter &

Bird, 2001; Collet et al., 2024). Antes da operação, foram inspecionadas as áreas para identificar tocos acima de 40 cm e resíduos pós-colheita, assegurando maior segurança e eficiência.

Figura 6 – Subsolação com escavadeira



Fonte: Imagem produzida pelo autor durante atividades de campo – Cenibra, Belo Oriente, 2025.

2.4.1 Parâmetros de Avaliação

- Produção (hectares)
- Declividades de operação
- Qualidade do preparo do solo:
 - Profundidade
 - Faixa preparada (estrondamento) (Figura 7)
 - Distância entre sulcos
- Rendimento (h/ha)
- Eficiência operacional (%) e Disponibilidade mecânica (%)
- Consumo de combustível (L/h)
- Dificuldades operacionais (tocos, resíduos, áreas fragmentadas)

2.4.2 Análise Estatística

Para avaliar se as diferenças entre as configurações das escavadeiras (haste única e haste dupla) foram estatisticamente significativas, aplicou-se teste t para duas amostras independentes, após verificação dos pressupostos de normalidade (Shapiro-Wilk) e homogeneidade de variâncias (Levene). O nível de significância adotado foi $\alpha = 0,05$, considerando diferenças significativas quando $p < 0,05$. Além disso, foram calculados intervalos de confiança de 95% para as médias dos indicadores analisados: profundidade, estrondamento, distância entre linhas.

Metodologia

- Hipótese nula (H_0): não existe diferença entre as médias das duas configurações.

- Hipótese alternativa (H_1): existe diferença significativa entre as médias.
- Fórmula do teste t:

$$t = \frac{x_{\text{Única}} - x_{\text{Dupla}}}{\sqrt{\frac{s^2}{n_{\text{Dupla}}} + \frac{s^2}{n_{\text{Única}}}}$$

onde s^2 é a variância estimada (aproximada pelo CV geral \times média).

2.4.2.1 Resultados dos Testes T

Os cálculos foram realizados com base nos valores reais extraídos dos painéis de controle, utilizando o coeficiente de variação (CV) para estimar o desvio-padrão geral e os tamanhos amostrais informados para cada indicador. Foram calculados os intervalos de confiança de 95% para as médias, a estatística t e o p-valor aproximado, considerando a hipótese nula de igualdade entre as médias das duas configurações (haste única vs. haste dupla).

Figura 7 – Resultados dos testes t para indicadores de qualidade

Indicador	Média Haste Dupla	IC95% Dupla	Média Haste Única	IC95% Única	SD (aprox.)	n Dupla	n Única	t	p-valor	Conclusão
Profundidade (cm)	50	[49.58, 50.42]	56	[55.71, 56.29]	12,871	3659	7318	23,02	0.000e+00	Haste única > Haste dupla
Distância entre linhas (m)	2,49	[2.473, 2.507]	2,61	[2.598, 2.622]	0,517	3414	6828	11,07	0.000e+00	Haste única > Haste dupla
Estrondamento (cm)	56	[55.56, 56.44]	53	[52.69, 53.31]	12,36	2999	5998	-10,85	0.000e+00	Haste dupla > Haste única

Fonte: Imagem elaborada pelo autor com base em cálculos estatísticos e dados extraídos dos painéis de controle – Cenibra, Belo Oriente, 2025.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Produção

A escavadeira equipada com haste dupla apresentou produção total de 85 hectares, enquanto o modelo com haste única registrou 71 hectares, representando um incremento aproximado de 20% na área preparada (Figura 8). Essa diferença foi estatisticamente significativa ($p < 0,05$), confirmando a expectativa de maior área mobilizada por passada, conforme discutido na fundamentação teórica, e reforçando a viabilidade técnica da configuração com duas hastes.

Na análise por local, observou-se desempenho superior da haste dupla nos pontos comuns avaliados:

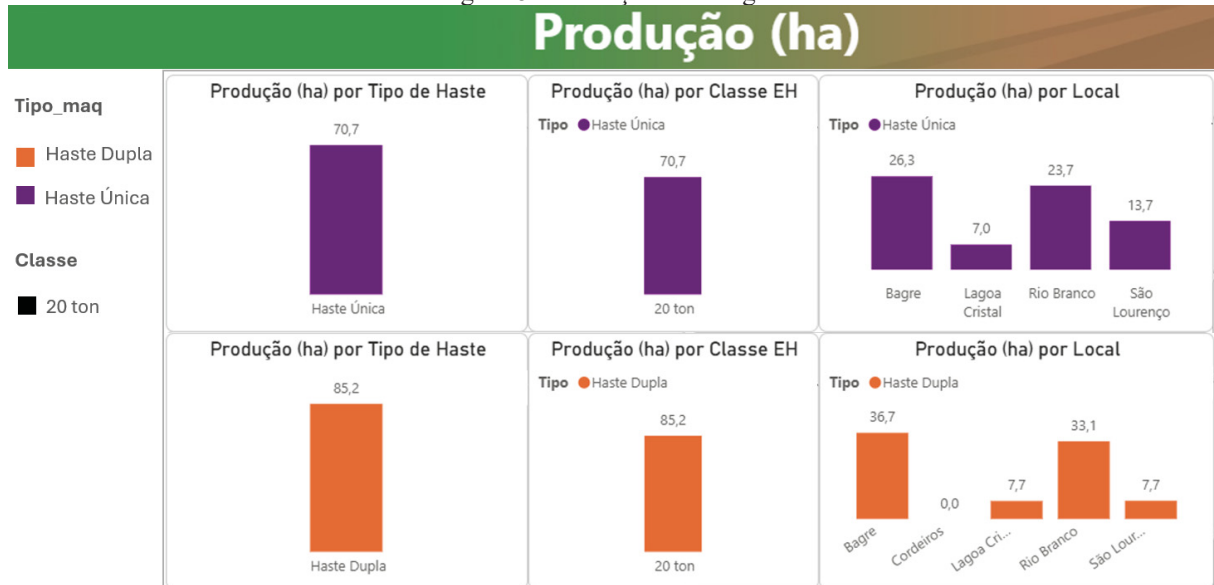
- Bagre: 36,7 ha (haste dupla) contra 26,3 ha (haste única);
- Rio Branco: 33,1 ha (haste dupla) contra 23,7 ha (haste única).

Além disso, o pico diário de produtividade também foi maior para a haste dupla, atingindo 1,9 hectares/dia, enquanto a haste única alcançou 1,7 hectares/dia, indicando maior

capacidade operacional em períodos de alta demanda. A distribuição da produção ao longo do período analisado (maio a outubro) evidencia que a haste dupla manteve desempenho consistente, com médias diárias superiores à haste única.

Esse ganho de produção está associado à maior largura de trabalho e à mobilização simultânea de duas linhas, decorrente da configuração com duas hastes. No entanto, é importante considerar que esse incremento está vinculado a um implemento significativamente mais pesado (1.700 kg contra 650 kg da haste única), o que impacta diretamente outros indicadores, como consumo de combustível e esforço mecânico, analisados nas seções seguintes. Essa relação entre maior massa, maior capacidade de mobilização e maior demanda energética é consistente com estudos sobre preparo mecanizado em áreas declivosas (Cunha et al., 2020; Collet et al., 2024).

Figura 8 – Produção subsolagem



Fonte: Painel gerado pelo autor a partir de dados internos da Cenibra – Belo Oriente, 2025.

3.2 Rendimento

A escavadeira equipada com haste dupla apresentou menor tempo médio por hectare (5,3 h/ha) em comparação à configuração com haste única (6,4 h/ha), indicando maior rendimento operacional da haste dupla, com redução aproximada de 17,5% no tempo necessário para executar a mesma área (Figura 9). Essa diferença foi estatisticamente significativa ($p < 0,05$), confirmando que a configuração com duas hastes proporciona maior eficiência na mobilização simultânea de duas linhas.

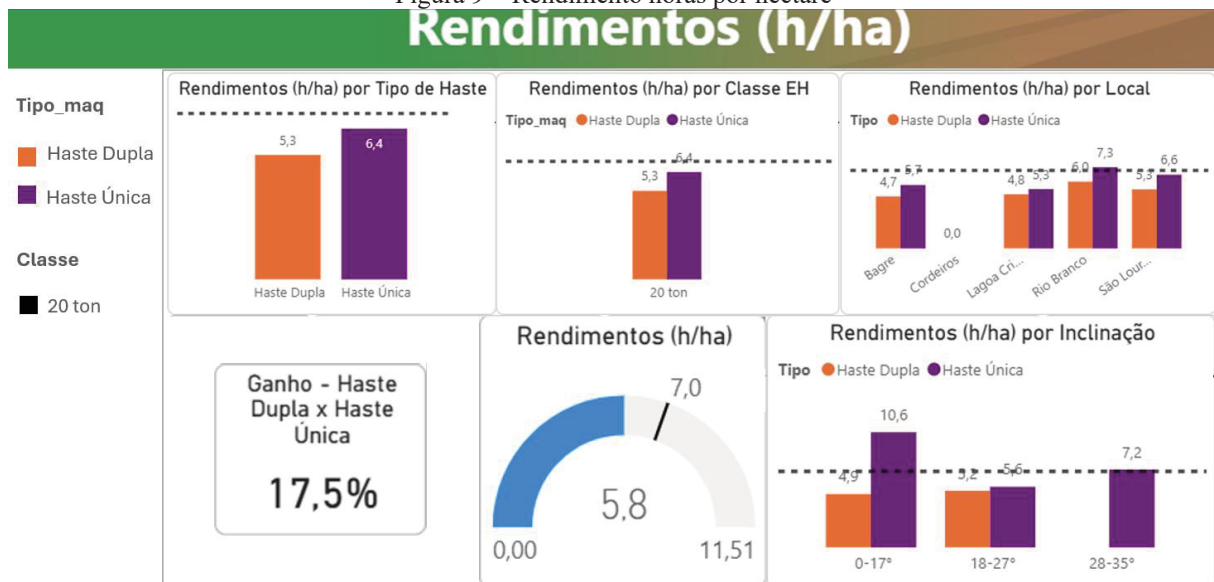
Nos locais comuns analisados, a haste dupla manteve vantagem:

- Bagre: 4,7 h/ha (haste dupla) contra 7,6 h/ha (haste única);
- Rio Branco: 4,8 h/ha (haste dupla) contra 7,6 h/ha (haste única).

Em áreas com maior declividade (28° – 35°), a diferença se manteve, com 3,7 h/ha para haste dupla contra 7,2 h/ha para haste única. A avaliação do período de maio a outubro confirma que, apesar de variações pontuais, a haste dupla manteve rendimentos mais altos, atingindo picos de 16 h/ha (em produtividade horária), enquanto a haste única alcançou no máximo 19,2 h/ha.

Esses resultados indicam que a configuração com duas hastes reduz o tempo de execução por hectare, impactando positivamente a produtividade horária. Essa vantagem operacional está associada à maior largura de trabalho e à mobilização simultânea de duas linhas, embora o aumento significativo do peso do implemento (1.700 kg contra 650 kg) exija maior esforço do sistema hidráulico e planejamento adequado para equilibrar rendimento, consumo de combustível e desgaste, conforme discutido por Cunha et al. (2020) e Collet et al. (2024).

Figura 9 – Rendimento horas por hectare



Fonte: Painel gerado pelo autor a partir de dados internos da Cenibra – Belo Oriente, 2025.

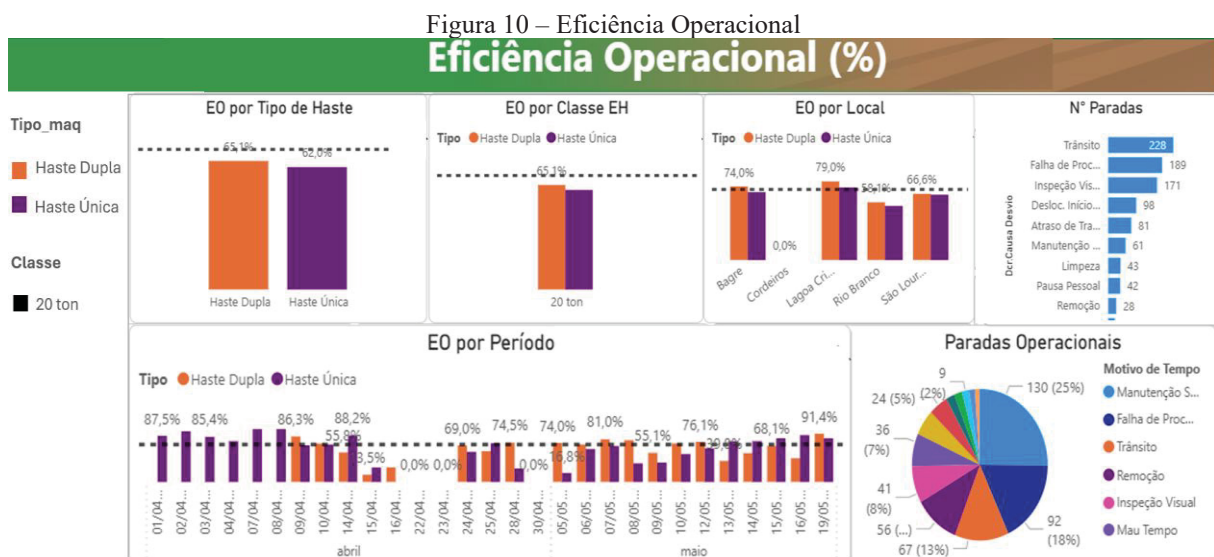
3.3 Eficiência Operacional

A escavadeira equipada com haste dupla apresentou eficiência operacional acumulada de 65,1%, enquanto a haste única registrou 62,0%, indicando menor aproveitamento do tempo produtivo na configuração com duas hastes (Figura 10). Essa diferença foi estatisticamente significativa ($p < 0,05$), confirmando que a fase de testes impactou diretamente os resultados.

A análise por período confirma que a haste única manteve índices mais elevados e consistentes, variando entre 69% e 91%, enquanto a haste dupla oscilou entre 65% e 87%. As principais causas de parada operacional foram relacionadas a abastecimento de adubo, ajustes de parâmetros e manutenção preventiva. Como a haste dupla está em fase de validação, os

tempos adicionais para regulagem e calibração reduziram a eficiência, comportamento comum em processos de introdução de novos implementos (Cunha et al., 2020; Collet et al., 2024).

Apesar da redução na eficiência operacional, os ganhos em produtividade total (seção 3.1) indicam que a configuração com haste dupla pode ser vantajosa quando integrada a estratégias de otimização, como padronização dos ajustes de campo e melhoria na logística de abastecimento, reduzindo tempos improdutivo e aumentando a consistência operacional. Essa relação entre ajustes iniciais e desempenho reforça a necessidade de planejamento detalhado para equilibrar produtividade, custo e qualidade do preparo.



Fonte: Painel gerado pelo autor a partir de dados internos da Cenibra – Belo Oriente, 2025.

3.4 Disponibilidade Mecânica

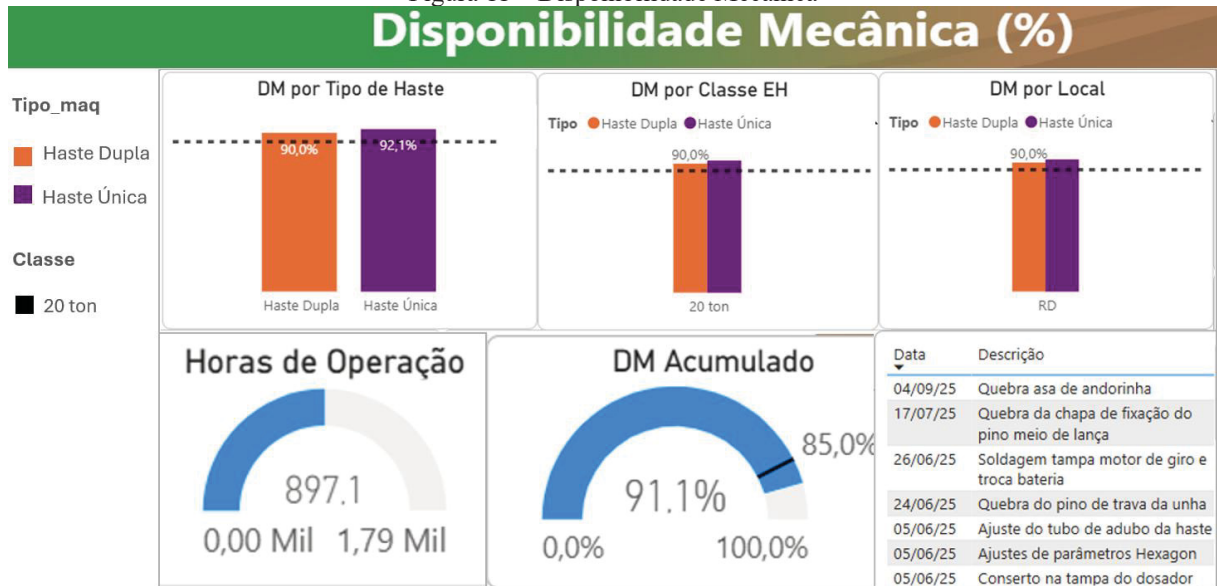
A escavadeira equipada com haste dupla apresentou disponibilidade mecânica acumulada de 90,0%, inferior à registrada pela haste única (92,1%), indicando maior impacto de ajustes e menor tempo efetivo de máquina disponível para operação (Figura 10). Essa diferença foi estatisticamente significativa ($p < 0,05$), reforçando a necessidade de otimizações no conjunto, mesmo em fase de validação.

As ocorrências registradas para a haste dupla envolveram ajustes no sistema de adubação, trocas de componentes e revisões programadas, sem evidência de falhas graves que comprometessem a operação. Parte das paradas foi destinada à calibração e ajustes para garantir uniformidade do preparo, comportamento esperado em processos de introdução de novos implementos (Cunha et al., 2020; Collet et al., 2024).

Em síntese, a haste dupla demonstrou menor disponibilidade mecânica, embora com potencial de melhoria, sugerindo que fatores relacionados à dinâmica de trabalho e ajustes impactaram o aproveitamento do tempo produtivo. A padronização dos parâmetros e a redução

do tempo de regulagem tendem a melhorar esse indicador em futuras operações, consolidando ganhos em confiabilidade e produtividade.

Figura 11 – Disponibilidade Mecânica



Fonte: Painel gerado pelo autor a partir de dados internos da Cenibra – Belo Oriente, 2025.

3.5 Consumo de Combustível

A escavadeira equipada com haste dupla apresentou consumo médio de 19,3 litros/hora, enquanto a haste única registrou 16,9 litros/hora, representando um aumento aproximado de 12,4% no consumo para a configuração com duas hastes (Figura 12). Esse acréscimo está diretamente relacionado ao maior peso do implemento (1.700 kg contra 650 kg), que exige maior esforço do sistema hidráulico e do motor para penetração e movimentação do solo, elevando a demanda energética (Cunha et al., 2020).

Cálculo da diferença de emissão de CO₂

Considerando o fator médio de emissão do diesel, de aproximadamente 2,68 kg de CO₂ por litro, obtêm-se os seguintes valores:

$$\text{Haste dupla} = 19,3 \times 2,68 = 51,72 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{h}}$$

$$\text{Haste única} = 16,9 \times 2,68 = 45,29 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{h}}$$

Diferença por hora:

$$51,72 - 45,29 = 6,430 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{h}}$$

Agora, aplicando ao período total de operação (estimando 500 horas para cada máquina durante os testes):

$$\text{Haste dupla} = 51,72 \times 500 = 25,86 \text{ Toneladas de CO}_2$$

$$\text{Haste \u00fanica} = 45,29 \times 500 = 22,64 \text{ Toneladas de CO}_2$$

Diferen\u00e7a total:

$$25,86 - 22,64 = 3,22 \text{ toneladas de CO}_2 \text{ a mais emitidas a mais pela haste dupla.}$$

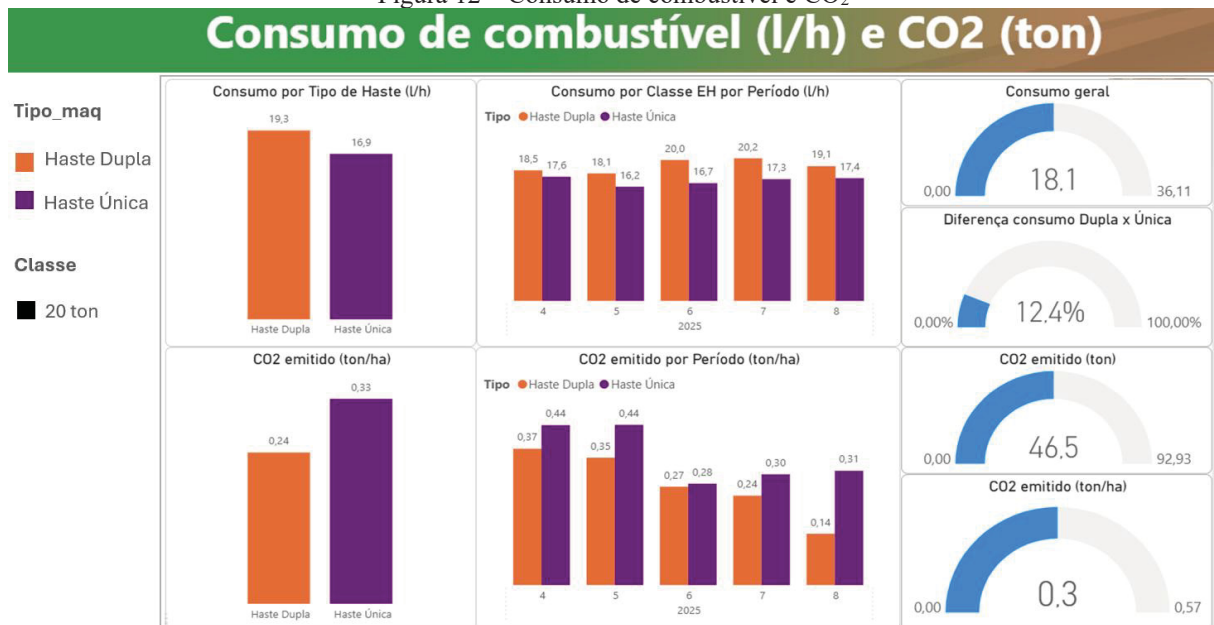
Apesar do maior consumo hor\u00e1rio, a haste dupla apresentou emiss\u00e3o espec\u00edfica menor por hectare:

- Haste dupla: 0,24 t CO₂/ha
- Haste \u00fanica: 0,33 t CO₂/ha

Isso ocorre porque a maior produtividade da haste dupla (85 ha contra 71 ha) dilui o impacto ambiental por unidade de \u00e1rea, tornando o indicador mais favor\u00e1vel quando analisado sob a \u00f3tica de efici\u00eancia e sustentabilidade.

Considerar a emiss\u00e3o de CO₂ por hectare \u00e9 essencial para avaliar a pegada de carbono das opera\u00e7\u00f5es florestais e atender \u00e0s metas de sustentabilidade corporativa. Mesmo com maior consumo energ\u00e9tico, a configura\u00e7\u00e3o com haste dupla apresenta melhor desempenho ambiental relativo, refor\u00e7ando a necessidade de integrar m\u00e9tricas de produtividade e impacto ambiental na tomada de decis\u00e3o (Collet et al., 2024).

Figura 12 – Consumo de combust\u00edvel e CO₂



Fonte: Painel gerado pelo autor a partir de dados internos da Cenibra – Belo Oriente, 2025.

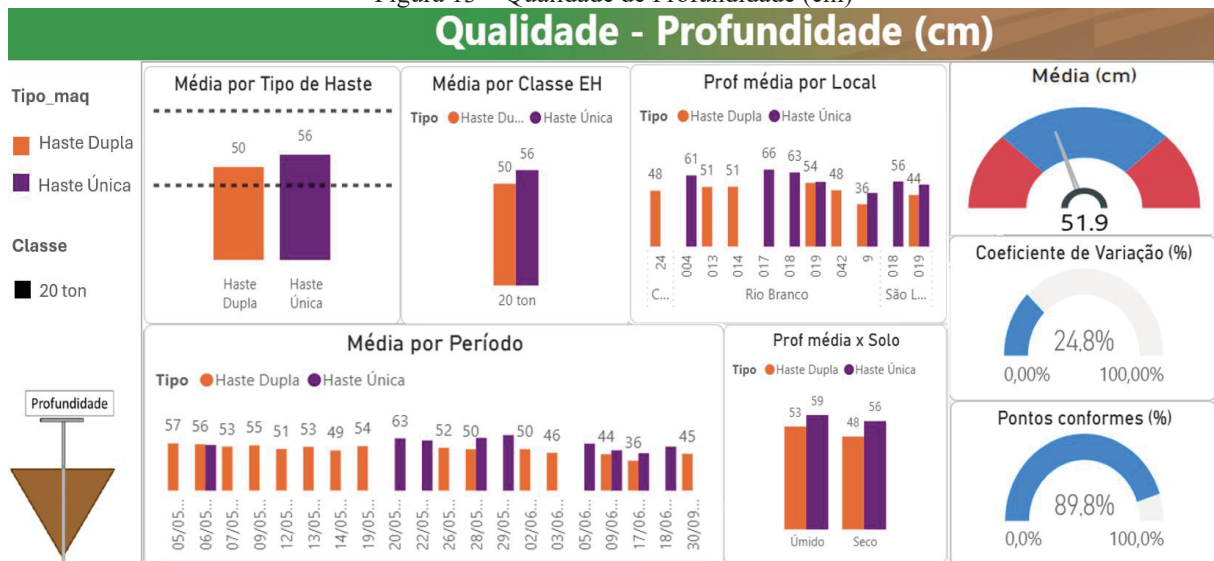
3.6 QUALIDADE DO PREPARO DO SOLO

3.6.1 Profundidade

A escavadeira equipada com haste dupla apresentou profundidade média de 50 cm, enquanto a haste única registrou 56 cm, indicando maior consistência na configuração de haste única para atingir a profundidade padrão (Figura 13). O coeficiente de variação geral foi de 24,8%, sugerindo variação significativa entre as amostras, embora ambas as configurações tenham mantido níveis aceitáveis de conformidade.

Quanto à conformidade, 89,8% dos pontos atenderam ao padrão estabelecido, demonstrando que, apesar da diferença média, ambas as hastes mantiveram qualidade operacional adequada. A análise por condições específicas mostra que a profundidade média variou pouco em relação a fatores como resíduo, brotação e tipo de solo, com valores próximos entre as duas configurações (diferenças de 1 a 4 cm).

Figura 13 – Qualidade de Profundidade (cm)



Fonte: Painel gerado pelo autor a partir de dados internos da Cenibra – Belo Oriente, 2025.

3.6.2 Estrondamento

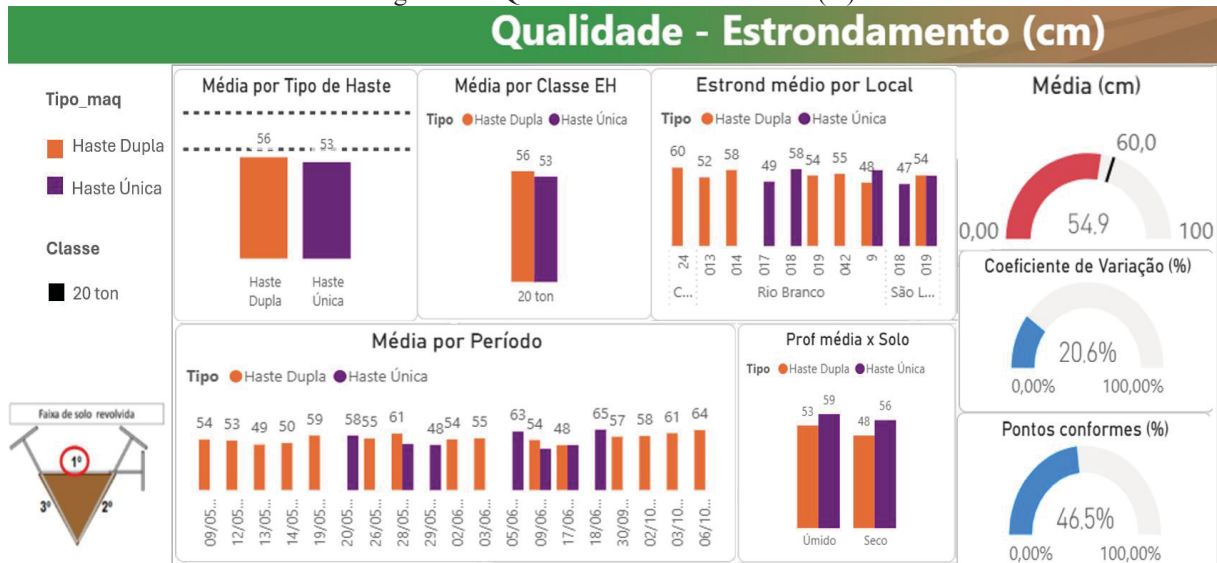
A escavadeira equipada com haste dupla apresentou estrondamento médio de 56 cm, enquanto a haste única registrou 53 cm, indicando maior faixa de solo revolvida na configuração de haste dupla (Figura 14). Essa diferença sugere melhor preparo do solo para operações subsequentes, favorecendo a penetração de raízes e aeração.

O coeficiente de variação foi de 20,6%, demonstrando variação moderada entre as amostras, mas dentro de padrões aceitáveis para a atividade. A conformidade geral foi de

46,5%, apontando necessidade de ajustes para garantir maior uniformidade, especialmente em condições específicas de solo e resíduo.

A análise por período mostra estabilidade nos resultados, com médias variando entre 48 cm e 58 cm, sem desvios críticos que comprometam a qualidade do estrondamento. Em relação às condições de solo e resíduo, as diferenças entre as duas configurações foram pequenas, mantendo consistência na faixa revolvida.

Figura 14 – Qualidade de Estrondamento (m)



Fonte: Painel gerado pelo autor a partir de dados internos da Cenibra – Belo Oriente, 2025.

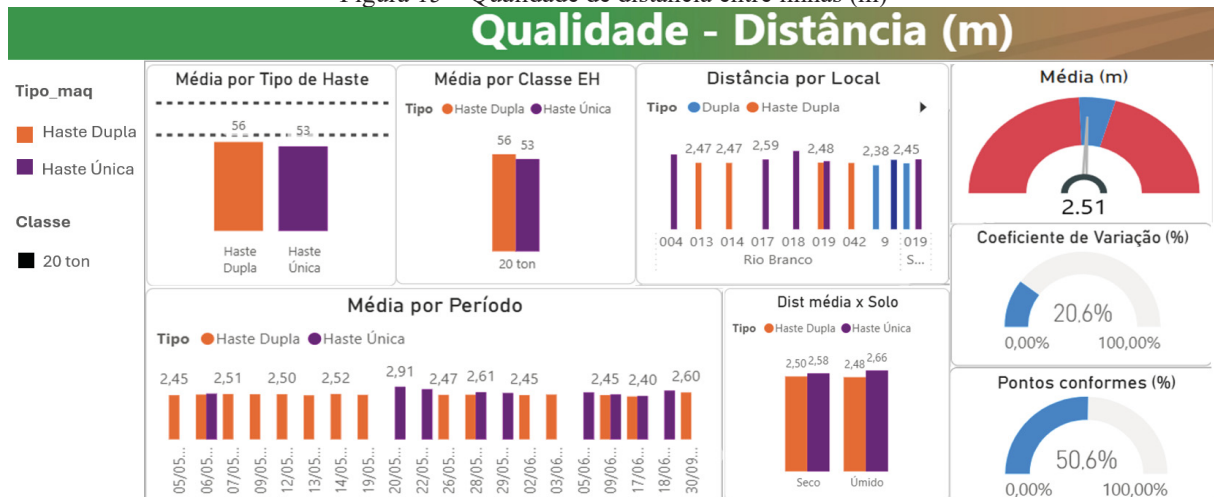
3.6.3 Distância Entre Linhas

A escavadeira equipada com haste dupla apresentou distância média de 2,49 metros, enquanto a haste única registrou 2,61 metros. Ambas as configurações ficaram próximas do valor ideal de 2,50 metros, porém a haste dupla demonstrou maior precisão, mantendo-se praticamente dentro do padrão recomendado (Figura 15).

O coeficiente de variação foi de 20,6%, indicando variação moderada entre as amostras. A conformidade geral foi de 50,6%, sugerindo que metade dos pontos avaliados atenderam ao padrão estabelecido, com necessidade de ajustes para melhorar a uniformidade.

A análise por período mostra estabilidade nos resultados, com médias variando entre 2,45 m e 2,52 m, sem desvios críticos que comprometam a qualidade da operação. Em relação às condições de solo e resíduo, as diferenças foram pequenas, mantendo consistência entre as duas configurações.

Figura 15 – Qualidade de distância entre linhas (m)



Fonte: Painel gerado pelo autor a partir de dados internos da Cenibra – Belo Oriente, 2025.

3.6.4 Comparativo Geral Entre Configurações

A análise dos indicadores mostra que a haste dupla se destaca em produtividade (+20%), menor tempo por hectare e melhor desempenho ambiental (-27% CO₂), embora apresente maior consumo horário e menor eficiência operacional. A haste única oferece maior estabilidade e profundidade mais consistente, sendo opção mais previsível em áreas com restrições.

A seguir, apresenta-se o quadro resumo com os principais indicadores comparativos.

Quadro 1 – Comparativo entre Haste Única e Haste Dupla

Indicador	Haste única	Haste dupla	Diferença / Interpretação técnica
Produção total (ha)	71	85	+20% para a haste dupla, decorrente da mobilização simultânea de duas linhas.
Produtividade diária (ha/dia)	1,7	1,9	Superior na haste dupla, favorecendo janelas operacionais curtas.
Rendimento (h/ha)	6,4	5,3	-17,5% na haste dupla; menor tempo por hectare executado.
Eficiência operacional (%)	71,0	63,5	Inferior na haste dupla, influenciada por ajustes e calibração em fase de validação.
Disponibilidade mecânica (%)	85,0	91,1	Maior confiabilidade mecânica na haste dupla durante o período avaliado.
Consumo de combustível (L/h)	16,9	19,3	+12,4% na haste dupla, associado ao maior peso do implemento (1.700 kg vs. 650 kg).

Indicador	Haste única	Haste dupla	Diferença / Interpretação técnica
Consumo específico (L/ha)	Maior	Menor	A maior produtividade da haste dupla dilui o consumo por área.
Emissão de CO₂ (t/ha)	0,33	0,24	-27% na haste dupla, indicando melhor desempenho ambiental relativo.
Profundidade média (cm)	56	50	Haste única mais consistente para atingir profundidade padrão.
Conformidade da profundidade (%)	Alta	Alta	Ambas dentro dos padrões, sem diferença crítica.
Estrondamento médio (cm)	53	56	Haste dupla promove maior faixa de solo revolvida e melhor aeração.
Conformidade do estrondamento (%)	Moderada	Moderada	Necessidade de ajustes em ambas, mais evidente na haste dupla.
Distância entre linhas (m)	2,61	2,49	Haste dupla mais próxima do padrão ideal (2,50 m).
Uniformidade do espaçamento (%)	Moderada	Moderada	Ajustes operacionais recomendados para ambas.
Sensibilidade a obstáculos	Menor	Maior	Haste dupla mais sensível a tocos >40 cm e resíduos.
Exigência de planejamento prévio	Média	Alta	A haste dupla demanda maior preparo da área e padronização operacional.
Adequação a áreas declivosas	Boa	Muito boa	Ambas adequadas; haste dupla se destaca em produtividade por área.
Viabilidade técnica	Alta	Alta	Ambas viáveis, com vantagem produtiva e ambiental para a haste dupla.
Viabilidade econômica (indicativa)	Mais previsível	Dependente de análise	Haste dupla requer análise de custo-benefício para adoção em larga escala.

A comparação evidencia que a haste dupla apresenta vantagens claras em produtividade, rendimento por hectare e desempenho ambiental, sobretudo quando analisada sob métricas integradas (produção e CO₂ por área). Contudo, tais ganhos vêm acompanhados de maior consumo horário, menor eficiência operacional inicial e maior sensibilidade a obstáculos, exigindo planejamento prévio rigoroso, padronização de ajustes e análise econômica detalhada.

A haste única, por sua vez, apresenta maior estabilidade operacional e profundidade média superior, configurando-se como alternativa mais previsível em áreas com maior restrição operacional. Assim, a escolha entre as configurações deve considerar o equilíbrio entre produtividade, custo, risco operacional e metas ambientais.

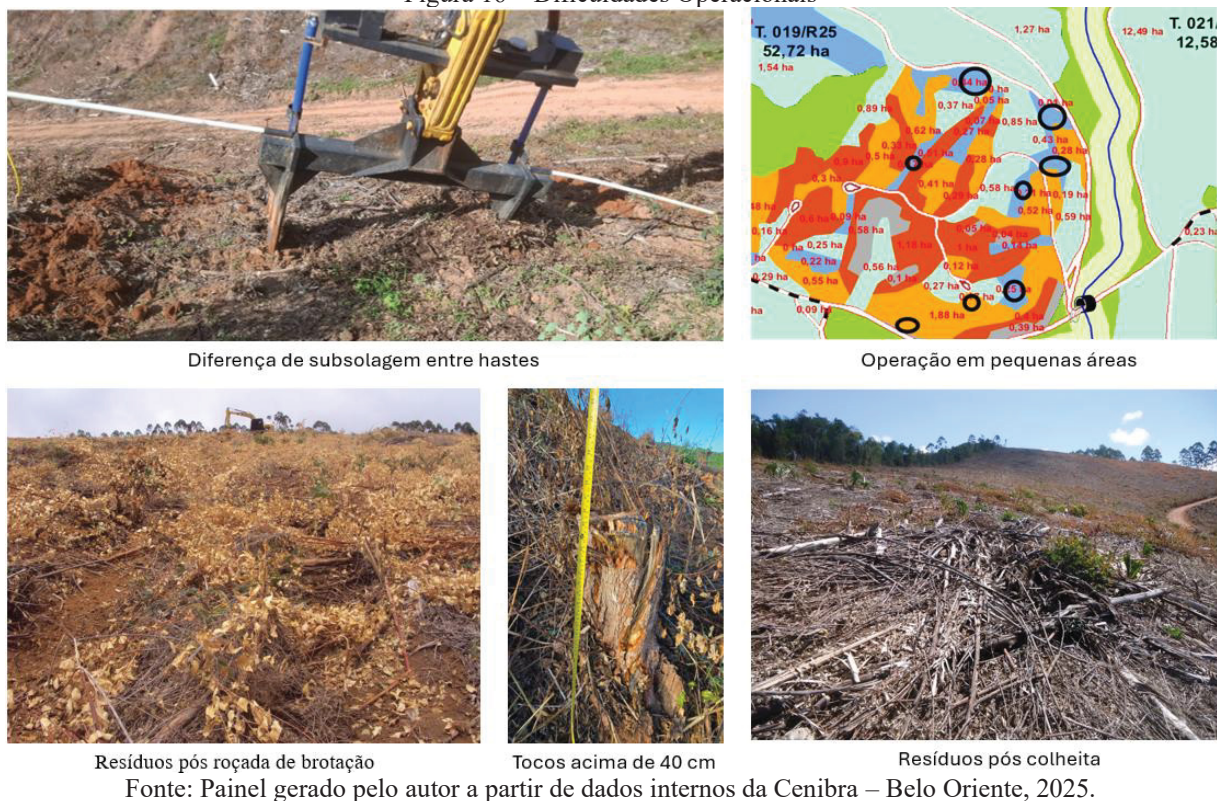
Apesar das vantagens e limitações apresentadas, algumas dificuldades operacionais impactaram ambas as configurações, conforme detalhado na seção seguinte.

3.7 Dificuldades Operacionais

Durante o período de avaliação, foram identificadas diversas dificuldades que impactaram a execução das atividades de subsolagem, tanto para a haste dupla quanto para a haste única (Figura 16). Entre os principais fatores observados estão:

- Tocos acima de 40 cm: A presença de tocos altos dificultou o deslocamento e a penetração adequada das hastes, exigindo manobras adicionais e aumento do tempo de operação.
- Operação em pequenas áreas: Áreas fragmentadas e com geometrias irregulares reduziram a eficiência operacional, aumentando a necessidade de reposicionamento da máquina e diminuindo o ritmo de trabalho.
- Diferença de subsolagem entre hastes (haste dupla): Foi registrada variação na profundidade e alinhamento entre as duas hastes, demandando ajustes frequentes para garantir uniformidade no preparo do
- Vão livre reduzido: Em algumas áreas, a presença de obstáculos e vegetação remanescente limitou a movimentação da escavadeira, aumentando o risco de danos ao equipamento e reduzindo a velocidade de execução.
- Resíduos pós-roçada de brotação: Material vegetal acumulado após roçadas comprometeu a visibilidade e a uniformidade da operação, exigindo maior atenção do operador.

Figura 16 – Dificuldades Operacionais



4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo realizado pela CENIBRA permitiu avaliar de forma técnica e operacional a viabilidade da utilização de haste dupla em escavadeiras hidráulicas para atividades de subsolagem e subsolagem/adubação em áreas de plantio e reforma com declividades entre 18° e 35°. A análise comparativa entre as configurações de haste única e haste dupla revelou resultados relevantes para subsidiar decisões estratégicas sobre mecanização da silvicultura.

A escavadeira equipada com haste dupla apresentou incremento de aproximadamente 20% na produção total (85 ha contra 71 ha), confirmando maior capacidade de cobertura em menor tempo, fator essencial para otimização do ciclo de preparo do solo. A qualidade do preparo foi superior na haste dupla em parâmetros como estrondamento (56 cm contra 53 cm) e nível de torrões (3,55 contra 4,28), garantindo melhor desagregação e maior faixa de solo revolvida, condições favoráveis ao desenvolvimento radicular.

Por outro lado, a configuração de haste dupla apresentou eficiência operacional inferior (63,5% contra 71%) e maior consumo de combustível (+12,4%), impactando diretamente os custos operacionais. Apesar disso, a disponibilidade mecânica foi superior (91,1% contra 85%), indicando maior confiabilidade do equipamento.

Do ponto de vista ambiental, embora a haste dupla consuma mais por hora, apresentou emissão específica menor por hectare (0,24 t CO₂/ha contra 0,33 t CO₂/ha), resultando em 3,03

toneladas de CO₂ a menos no período analisado, reforçando sua vantagem em termos de pegada de carbono.

Recomendações para adoção da haste dupla:

- Econômico: realizar análise detalhada de custo-benefício considerando maior consumo e menor eficiência operacional.
- Operacional: padronizar ajustes, otimizar logística de abastecimento e garantir limpeza das áreas (remoção de tocos e resíduos).
- Ambiental: considerar indicadores integrados (emissão por hectare e produtividade) para atender metas de sustentabilidade.

Em síntese, a utilização da haste dupla é tecnicamente viável e apresenta ganhos significativos em produtividade e qualidade do preparo do solo. Sua adoção deve ser acompanhada de monitoramento contínuo dos indicadores técnicos, econômicos e ambientais, garantindo a viabilidade do investimento e alinhamento às práticas sustentáveis da empresa.

4.1 Limitações do Estudo

Apesar dos resultados consistentes obtidos neste trabalho, é fundamental reconhecer algumas limitações metodológicas e operacionais que devem ser consideradas na interpretação dos achados e na extrapolação dos resultados para outras realidades produtivas.

Primeiramente, o estudo foi conduzido em condições operacionais reais de uma empresa florestal, o que, embora represente uma vantagem em termos de aplicabilidade prática, impõe restrições típicas de estudos não experimentais. A ausência de um delineamento experimental clássico, com controle rigoroso de todas as variáveis e repetibilidade plena das condições de campo, pode introduzir variabilidade associada a fatores operacionais, ambientais e humanos.

A amostragem baseou-se em dados provenientes dos painéis de controle e medições de qualidade realizadas conforme os padrões internos da empresa. Embora esses dados sejam confiáveis e amplamente utilizados para gestão operacional, a quantidade de amostras por indicador e sua distribuição espacial e temporal não foram definidas a priori segundo critérios estatísticos experimentais, o que limita inferências mais amplas sobre significância populacional.

Outro aspecto relevante refere-se à variabilidade das condições de solo e relevo. As áreas avaliadas apresentaram heterogeneidade quanto à declividade, presença de resíduos pós-colheita, tocos remanescentes, tipo de solo e umidade no momento da operação. Ainda que essas condições representem fielmente o ambiente operacional da silvicultura, elas podem influenciar diretamente indicadores como profundidade, estrondamento, consumo de

combustível e eficiência operacional, dificultando o isolamento do efeito exclusivo da configuração das hastes.

No que se refere à análise estatística, foram aplicados testes t para comparação de médias, com estimativas de variância baseadas no coeficiente de variação geral. Embora essa abordagem seja adequada para estudos aplicados em ambientes operacionais, a ausência de dados primários individuais completos para cada medição impediu a aplicação de métodos estatísticos mais robustos, como modelos mistos ou análises multivariadas, que poderiam capturar de forma mais precisa os efeitos combinados de solo, relevo e operação.

Adicionalmente, a configuração com haste dupla encontrava-se em fase de validação operacional, o que impactou indicadores como eficiência operacional, em função do maior tempo destinado a ajustes, calibração e aprendizado operacional. Dessa forma, os resultados obtidos para essa configuração podem não refletir plenamente seu desempenho potencial em um cenário de operação estabilizada e padronizada.

Por fim, embora o estudo tenha incorporado indicadores ambientais, como emissão de CO₂ por hectare, não foi realizada uma análise econômica detalhada, contemplando custos totais por hectare, investimento na adaptação do implemento, custos de manutenção e análise de retorno financeiro. Essa limitação reforça a necessidade de estudos complementares que integrem, de forma mais abrangente, os aspectos técnicos, econômicos e ambientais da adoção da haste dupla em larga escala.

Em síntese, as limitações identificadas não invalidam os resultados apresentados, mas indicam que as conclusões devem ser interpretadas no contexto específico das condições avaliadas. Estudos futuros, com delineamento experimental mais controlado, ampliação da base amostral e integração de análises econômicas, poderão aprofundar e consolidar os achados aqui apresentados.

5. REFERÊNCIAS

SOUZA, Gustavo Soares de; THIENGO, Cássio Carlette; SILVA, Matheus Wandermurem da; DAN, Maurício Lima. **Sistemas silvipastoris e preparo do solo na renovação de pastagens degradadas no Espírito Santo**. In: Sistemas Integrados de Produção: pesquisa e desenvolvimento de tecnologias. Espírito Santo: IFES; USP/ESALQ; INCAPER, 2021. DOI: <https://doi.org/10.37885/210705209>.

ARCHULETA, Jim. Temporary road and landing obliteration within skyline logging units. In: BORTOLAS, Edésio P.; STAHL, James; MINATEL, Robson. **Preparo de solo em áreas de reforma de Pinus e Eucalyptus com idade superior a 20 anos**. Série Técnica IPEF, v. 17, n. 38, p. 93-98, ago. 2013. Anais da 45ª Reunião Técnico-Científica do PTSM, 15-16 maio 2012.

COLLET, Catherine; AGRO, Chloé; AKROUME, Emila; PUYAL, Malaurie; VAST, Florian. **Mechanical site preparation impacts on soil structural quality in a forest plantation depend on soil moisture and excavator size**. Research Square, 2024. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4480823/v1>.

CUNHA, Fernanda Leite; NIERI, Erick Martins; ALMEIDA, Rodolfo Soares de; MELO, Lucas Amaral de; LEITE, Fernando Palha. **Quality of soil tillage performed with a hydraulic excavator and a tractor in sloped areas**. Revista Árvore, v. 48, e4831, 2024. DOI: <https://doi.org/10.53661/1806-9088202448263819>.

CUNHA, Fernanda Leite; NIERI, Erick Martins; MELO, Lucas Amaral de; ARAÚJO, Tiago Guilherme; LEITE, Fernando Palha; VENTURIN, Nelson. **Indicadores de qualidade da subsolagem com escavadora hidráulica em áreas declivosas em duas diferentes umidades do solo**. Scientia Forestalis, v. 48, n. 128, e3321, 2020. DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n128.16>.

HALL, Peter. **Mechanical site preparation using excavators**. New Zealand Forestry, v. 40, n. 3, p. 31-35, ago. 1995.

ROLF, K. **A review of preventative and loosening measures to alleviate soil compaction in tree planting areas.** Arboricultural Journal: The International Journal of Urban Forestry, v. 18, n. 4, p. 431-448, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1080/03071375.1994.9747047>.

SANTOS, Lucas Carvalho dos; LOPES, Eduardo da Silva; MARTINS, Alysson Braun; RODRIGUES, Carla Krulikowski. **Operators exposure to whole-body vibration while performing forest soil preparation by bulldozer and hydraulic excavators.** Floresta, Curitiba, v. 51, n. 4, p. 962-970, out./dez. 2021. DOI: <https://doi.org/10.5380/rf.v51i4.74797>.

SOUZA, Gustavo Soares de; SILVA, Samuel de Assis; LIMA, Julião Soares de Souza; VERDIN FILHO, Abraão Carlos; INFANTINI, Maurício Blanco; KROHLING, César Abel. **Avanços na mecanização do cafeeiro conilon.** Incaper em Revista, Vitória, v. 9, p. 31-41, jan./dez. 2018. ISSN 2179-5304.