



Universidade Federal do Sul da Bahia - UFSB
Programa de Pós-Graduação em Ciências e Sustentabilidade - PPGCS

ALEXANDRO ROCHA DA SILVA JUNIOR

SISTEMAS DE COVEAMENTO PARA O TRANSPLANTIO DE MUDAS NA
CACAUCULTURA: Desempenho Operacional e Viabilidade Econômica.

TEIXEIRA DE FREITAS - BA

2026

ALEXANDRO ROCHA DA SILVA JUNIOR

**SISTEMAS DE COVEAMENTO PARA O TRANSPLANTIO DE MUDAS NA
CACAUICULTURA:** Desempenho Operacional e Viabilidade Econômica.

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em
Ciências e Sustentabilidade da Universidade Federal do
Sul da Bahia, como parte das exigências para obtenção do
título de mestre em Ciências e Sustentabilidade.

Orientador: Prof Dr. Rafael Henrique de Freitas Noronha

TEIXEIRA DE FREITAS - BA

2026

ALEXANDRO ROCHA DA SILVA JUNIOR

**SISTEMAS DE COVEAMENTO PARA O TRANSPLANTIO DE MUDAS NA
CACAUICULTURA: Desempenho Operacional e Viabilidade Econômica.**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em
Ciências e Sustentabilidade da Universidade Federal do
Sul da Bahia, como parte das exigências para obtenção do
título de mestre(a) em Ciências e Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Henrique de Freitas Noronha

Este trabalho foi submetido à avaliação e julgado aprovado em 27 de fevereiro de 2026.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **RODRIGO DIEGO QUOOS**
Data: 31/03/2026 21:39:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Rodrigo Diego Quoos
IF BAIANO

Documento assinado digitalmente
 **ANTONIO TASSIO SANTANA ORMOND**
Data: 30/03/2026 10:52:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Antônio Tássio Santana Ormond
UEMG

Documento assinado digitalmente
 **ELEN SONIA MARIA DUARTE ROSA**
Data: 01/04/2026 15:33:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Elen Sônia Maria Duarte Rosa
IF BAIANO

Documento assinado digitalmente
 **RAFAEL HENRIQUE DE FREITAS NORONHA**
Data: 01/04/2026 18:18:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

ORIENTADOR
Dr. Rafael Henrique de Freitas Noronha
UFSB

TEIXEIRA DE FREITAS - BA

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade Federal do Sul da Bahia
Sistema de Bibliotecas

S586s	Silva Junior, Alexandro Rocha da. Sistemas de coveamento para o transplante de mudas na cacauicultura: desempenho operacional e viabilidade econômica / Alexandro Rocha da Silva Junior. Teixeira de Freitas, 2026. 67 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Sul da Bahia, Campus Paulo Freire, Centro de Formação em Desenvolvimento Territorial, Programa de Pós-Graduação em Ciências e Sustentabilidade, 2026. Orientador: Prof. Dr. Rafael Henrique de Freitas Noronha. 1. Cacauicultura. 2. Mecanização agrícola. 3. Análise de custo-benefício. I. Título. II. Noronha, Rafael Henrique de Freitas. CDD – 633.74
-------	---

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho, antes de tudo, a Deus, fonte de vida, inspiração e coragem. Em cada momento de dúvida, em cada madrugada de estudo e nas horas de exaustão física e mental, encontrei n'Ele a força para seguir.

Aos meus pais, Alexandro e Cosmiranda, exemplos de dignidade, perseverança e honestidade, que me ensinaram que o conhecimento é um patrimônio que ninguém pode tirar.

À minha avó, Maria da Penha (*in memoriam*), que com seu carinho, conselhos e fé inabalável deixou marcas eternas em minha formação como ser humano.

À minha esposa Luciane, companheira incansável, por todo apoio, incentivo, compreensão e amor ao longo dessa caminhada, dividindo comigo alegrias e dificuldades.

Aos meus irmãos e demais familiares, que celebraram comigo cada pequena conquista, mesmo sem conhecer todos os desafios técnicos, metodológicos e emocionais que a pesquisa exigiu.

A todos os professores que cruzaram meu caminho, desde a infância até o mestrado, cada um contribuindo com sementes de conhecimento que germinaram e floresceram neste momento.

Em especial, ao Prof. Dr. Julio Cláudio Martins (*in memoriam*), por ter sido um farol em minha graduação, incentivando-me a seguir a carreira acadêmica e acreditar no potencial transformador da ciência.

Aos agricultores que, com dedicação, cultivam a terra e alimentam o mundo. Este trabalho busca soluções para aumentar a eficiência e otimizar o trabalho no campo, especialmente no plantio de cacau.

Este trabalho é para vocês. É para a minha história, para as mãos que trabalham a terra, e para as gerações que virão colher os frutos do conhecimento aqui semeado.

AGRADECIMENTOS

A realização deste mestrado é o resultado de um esforço coletivo, e minha gratidão se estende a todos que, de alguma forma, fizeram parte desta caminhada.

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por me conceder a fé, a saúde e a perseverança indispensáveis para superar os desafios e concluir esta importante etapa da minha vida.

Aos meus professores, que com seus conhecimentos iluminaram meu caminho acadêmico. Manifesto minha eterna gratidão ao Prof. Dr. Júlio Cláudio Martins (*in memoriam*), que, ainda na graduação, despertou em mim a paixão pela pesquisa.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rafael Henrique de Freitas Noronha, pela orientação competente, pela confiança depositada, pela paciência e pelo rigor científico que foram cruciais para a qualidade deste trabalho.

Agradeço também aos membros da banca examinadora e aos demais docentes do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Sustentabilidade.

Aos meus amigos, Sávio Spnola e Milena Bandeira, por tornarem a jornada mais leve com momentos de descontração, pela solidariedade e pela troca de conhecimento. A amizade de vocês foi um presente.

À Universidade Federal do Sul da Bahia e ao seu corpo técnico-administrativo, por toda a estrutura e suporte oferecidos.

A CEPLAC, pela disponibilização do laboratório experimental, fundamental para a realização das análises e etapas práticas desta pesquisa.

Finalmente, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fundamental apoio financeiro, através da bolsa de mestrado, que viabilizou minha dedicação integral a esta pesquisa.

EPÍGRAFE

“Se você não pode voar, corra;
se não puder correr, ande;
se não puder andar, rasteje;
mas continue em frente de qualquer jeito.”
Martin Luther King Jr

SILVA JUNIOR, A. R. SISTEMAS DE COVEAMENTO PARA O TRANSPLANTIO DE MUDAS NA CACAUCULTURA: Desempenho Operacional e Viabilidade Econômica. Orientador: Rafael Henrique de Freitas Noronha. 2025. Dissertação (Mestrado em Ciências e Sustentabilidade) – Universidade Federal do Sul da Bahia, Teixeira de Freitas, 2025.

RESUMO

A implantação de lavouras de cacau (*Theobroma cacao* L.) enfrenta desafios devido a operações que, muitas vezes, são caras e pouco eficientes, especialmente o coveamento para o transplante de mudas, que impacta diretamente os custos de instalação. Ainda há pouca tecnologia mecanizada para essa etapa, e faltam dados claros sobre os parâmetros operacionais e econômicos que possam orientar melhor as decisões dos produtores. Por isso, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho operacional e verificar a viabilidade econômica de diferentes sistemas de coveamento utilizados na implantação de plantações de cacau. O experimento foi realizado no Departamento de Mecanização Agrícola da Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira (CEPLAC), em parceria com a Universidade Federal do Sul da Bahia, campus Jorge Amado, em Itabuna, Bahia, usando um delineamento em blocos ao acaso para controlar a variabilidade do solo. Foram avaliados três tratamentos (MAN: manual, PSM: semi mecanizado e MEC: mecanizado), distribuídos em quatro blocos (A, B, C e D). Em cada bloco, cada tratamento contou com oito repetições, totalizando 96 unidades experimentais (ciclos operacionais). Foi feita uma análise detalhada da demanda de tempo operacional (ha h^{-1}), dos custos (US\$/cova) e dos indicadores de viabilidade de investimento (VPL, TIR e Payback Descontado). Os resultados demonstraram que, embora a demanda de tempo tenha variado numericamente (PSM e MEC: $0,02 \text{ ha h}^{-1}$; MAN: $0,04 \text{ ha h}^{-1}$), não houve diferença estatística significativa entre os tratamentos. Em termos econômicos, o sistema manual (MAN) apresentou o menor custo por cova (US\$ 0,30), seguido pelo semi-mecanizado (PSM) (US\$ 0,42) e pelo mecanizado (MEC) (US\$ 0,61). A análise de investimento a longo prazo, considerando a depreciação do capital e os custos de oportunidade, corroborou esse cenário. Os sistemas MAN e PSM apresentaram indicadores de atratividade superiores, com Valor Presente Líquido (VPL) de US\$ 338.491,67 e US\$ 335.136,42, respectivamente, e Taxas Internas de Retorno (TIR) de 68,0% e 65,6%. Em contrapartida, o sistema MEC obteve os menores índices, com VPL de US\$ 223.636,54 e TIR de 26,4%. O Payback Descontado foi de 3,30 anos para o MAN e 3,35 anos para o PSM, em comparação aos 5,12 anos exigidos pelo MEC. Conclui-se que o sistema MEC não apresentou superioridade operacional estatística que justificasse seu maior custo unitário e menor viabilidade financeira. O sistema PSM consolidou-se como a alternativa mais viável e estratégica, pois oferece desempenho operacional equivalente ao mecanizado com indicadores econômicos resilientes e versatilidade para atuar tanto em pleno sol quanto em sistemas de cabruca.

Palavras-chave: *Theobroma cacao* L., Mecanização Agrícola, Eficiência Operacional, Análise de Custos

SILVA JUNIOR, Alexandro Rocha da. **COVERING SYSTEMS FOR TRANSPLANTING SEEDLINGS IN COCOA CULTIVATION: Operational Performance and Economic Viability.** Advisor: Rafael Henrique de Freitas Noronha. 2025. Dissertation (Master's Degree in Science and Sustainability) – Federal University of Southern Bahia, Teixeira de Freitas, 2025.

ABSTRACT

The establishment of cocoa (*Theobroma cacao* L.) plantations faces challenges due to operations that are often costly and inefficient, particularly the digging of planting holes for seedling transplantation, which directly impacts establishment costs. There is still little mechanized technology available for this stage, and there is a lack of clear data on the operational and economic parameters that could better guide producers' decisions. Therefore, the objective of this study was to evaluate the operational performance and verify the economic viability of different hole-digging systems used in the establishment of cocoa plantations. The experiment was conducted at the Department of Agricultural Mechanization of the Executive Committee of the Cocoa Farming Plan (CEPLAC), in partnership with the Federal University of Southern Bahia, Jorge Amado campus, in Itabuna, Bahia, using a randomized block design to control for soil variability. Three treatments were evaluated (MAN: manual, PSM: semi-mechanized, and MEC: mechanized), distributed across four blocks (A, B, C, and D). In each block, each treatment had eight replicates, totaling 96 experimental units (operational cycles). A detailed analysis was conducted of operational time requirements (ha h^{-1}), costs (USD/hole), and investment feasibility indicators (NPV, IRR, and Discounted Payback). The results showed that, although the time requirement varied numerically (PSM and MEC: $0,02 \text{ ha h}^{-1}$; MAN: $0,04 \text{ ha h}^{-1}$), there was no statistically significant difference among the treatments. In economic terms, the manual system (MAN) had the lowest cost per hole (US\$ 0.30), followed by the semi-mechanized system (PSM) (US\$ 0.42) and the mechanized system (MEC) (US\$ 0.61). The long-term investment analysis, considering capital depreciation and opportunity costs, corroborated this scenario. The MAN and PSM systems showed superior attractiveness indicators, with a Net Present Value (NPV) of \$338,491.67 and \$335,136.42, respectively, and Internal Rates of Return (IRR) of 68.0% and 65.6%. In contrast, the MEC system obtained the lowest indices, with an NPV of \$223,636.54 and an IRR of 26.4%. The Discounted Payback Period was 3.30 years for MAN and 3.35 years for PSM, compared to the 5.12 years required by MEC. It is concluded that the MEC system did not demonstrate statistical operational superiority that would justify its higher unit cost and lower financial viability. The PSM system established itself as the most viable and strategic alternative, as it offers operational performance equivalent to mechanized systems with resilient economic indicators and the versatility to operate both in full sun and in cabruca systems.

Keywords: *Theobroma cacao* L., Agricultural Mechanization, Operational Efficiency, Cost Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cavador articulado manual.....	28
Figura 2. Motocoveador Stihl BT 131.....	29
Figura 3: JD 5080E TDA.....	30
Figura 4. Perfurador Hidráulico.....	30
Figura 5. Fluxograma do estudo de tempos e movimentos do ciclo operacional, dividido em Tempo de produção, Tempo Auxiliar e Tempo Improdutivo.....	31
Figura 6. Esquema de distribuição dos tratamentos no Delineamento em Blocos Casualizados com Repetições dentro dos blocos (DBC), adotado no experimento com sistemas de abertura de covas para o cultivo do cacau.....	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Critérios para Avaliação de Faixas de Desempenho e Variância no Estudo....	23
Tabela 2 - Dados de valor de aquisição, vida útil estimada e horas trabalhadas/ano das máquinas.....	38
Tabela 3. Análise descritiva dos tempos (h ha ⁻¹) dos componentes do ciclo operacional de abertura de covas, por sistema.....	46
Tabela 4. Análise estatística descritiva para os indicadores de tempo e desempenho operacional.....	48
Tabela 5. Estimativa da disponibilidade mecânica, eficiência de utilização e eficiência operacional.....	49
Tabela 6. Valores médios de velocidade (VM), capacidade de campo efetiva (CcE), capacidade de campo operacional (CcO) e rendimento de campo efetivo (RcE).....	50
Tabela 7. Custos horários (U\$ h ⁻¹) dos diferentes sistemas de coveamento no transplântio de mudas de cacau.....	52
Tabela 8. Custo Operacional (U\$ ha ⁻¹) dos diferentes sistemas de coveamento para o transplântio de mudas.....	53
Tabela 9 - Estimativa de Custo Total no Ano de Implantação (Projeto de 20 ha).....	55
Tabela 10 - Análise de Investimento no Cenário Moderado em Dólar (Ciclo de 10 Anos)	56
Tabela 11 - Análise de Sensibilidade do VPL (U\$) à Variação no Preço da Arroba.....	57
Tabela 12 - Análise de Sensibilidade do VPL (R\$) ao Custo da Mão de Obra.....	58
Tabela 13 - Matriz de Análise Qualitativa e Estratégica dos Sistemas de coveamento..	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AGRIANUAL – Anuário da Agricultura Brasileira

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

BA – Bahia

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CEPLAC – Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira

CMN – Conselho Monetário Nacional

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICCO – International Cocoa Organization

IF BAIANO – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano

NBR – Norma Brasileira

PPGCS – Programa de Pós-Graduação em Ciências e Sustentabilidade

UEMG – Universidade do Estado de Minas Gerais

UFSB – Universidade Federal do Sul da Bahia

LISTA DE SÍMBOLOS

% – Porcentagem

°C – Graus Celsius

< – Menor que

> – Maior que

$\leq$ – Menor ou igual

$\geq$ – Maior ou igual

$\times$ – Multiplicação

cm – Centímetro

cm³ – Centímetro cúbico

h – Hora

ha – Hectare

ha h⁻¹ – Hectare por hora

km – Quilômetro

km h⁻¹ – Quilômetros por hora

m – Metro

mm – Milímetro

mm ano⁻¹ – Milímetros por ano

p – Probabilidade estatística

p < 0,05 – Nível de significância estatística

R\$ – Real (moeda brasileira)

R\$ ha⁻¹ – Reais por hectare

R\$ h⁻¹ – Reais por hora

R\$ cova⁻¹ – Reais por cova

rpm – Rotações por minuto

ln(x) – Logaritmo natural

GLOSSÁRIO DAS VARIÁVEIS OPERACIONAIS E ECONÔMICAS

A-D – Teste de Anderson-Darling
ANOVA – Análise de Variância
AS – Alojamento e seguro do equipamento
CcE – Capacidade de campo efetiva
CcO – Capacidade de campo operacional
CF – Custos fixos
CV – Coeficiente de variação
CV – Custos variáveis
D – Depreciação
DBC – Delineamento em blocos casualizados
Dm – Disponibilidade mecânica
DP – Desvio padrão
Eo – Eficiência operacional
Eu – Eficiência de utilização
J – Juros sobre capital investido
K-S – Teste de Kolmogorov-Smirnov
L – Vida útil do equipamento
MAN – Sistema manual de abertura de covas

MEC – Sistema mecanizado de abertura de covas
N – Número de horas de uso anual
PSM – Sistema semi-mecanizado de abertura de covas
RcE – Rendimento de campo efetivo
ST – Salário do tratorista
S-W – Teste de Shapiro-Wilk
TJ – Taxa de juros
Taux – Tempo auxiliar
Timp – Tempo improdutivo
Tprod – Tempo produtivo
Trep – Tempo de reparos
Ttot – Tempo total
VI – Valor inicial do equipamento
VF – Valor final ou valor residual
VM – Velocidade média de operação
VPL – Valor presente líquido
TIR – Taxa interna de retorno

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
2. OBJETIVO GERAL.....	18
2.1. Objetivos Específicos.....	18
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1 Cultivo de Cacau e Importância do Preparo do Solo.....	19
3.2. Mecanização Agrícola no Preparo do Solo.....	20
3.3. Fatores que Afetam o Desempenho de Operações Agrícolas.....	20
3.4. Estatística Aplicada em Experimentos Agrícolas.....	21
3.5 Estudos de Tempos e Movimentos.....	24
3.6 Custos Operacionais em Operações Manuais.....	25
3.7 Custos Operacionais em Operações Semi mecanizadas e mecanizadas.....	26
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	28
4.1 Local do Estudo.....	28
4.2 Descrição dos Sistemas de Coveamento.....	28
4.3 Coleta e Análise dos Tempos de Trabalho.....	31
4.4 Delineamento Experimental.....	31
4.5 Análise Estatística.....	32
4.6 Desempenho Operacional.....	33
4.6.1 Definição dos Tempos de Trabalho.....	33
4.6.2 Disponibilidade Mecânica (Dm).....	34
4.6.3 Eficiência de Utilização (Eu).....	34
4.6.4 Eficiência Operacional (Eo).....	35
4.6.6 Capacidade de Campo Operacional (CcO).....	36
4.6.7 Rendimento de Campo Efetivo (RcE).....	36
4.7 Viabilidade econômica operacional.....	37
4.7.1 Custos Fixos (CF).....	37
4.7.2 Depreciação (D).....	37
4.7.3 Juros (J).....	37
4.7.4 Seguro (S).....	39
4.7.5 Salário do tratorista (ST).....	39
4.7.6 Custos Variáveis (CV).....	39
4.7.7 Combustíveis (C).....	40
4.7.8 Lubrificantes (L).....	40
4.7.9 Reparos e manutenção (RM).....	41
4.7.10 Determinação dos Custos Horário e Operacional.....	41
4.8 Análise de Viabilidade Econômico-Financeira.....	42
4.8. 1 Valor Presente Líquido (VPL).....	43
4.8.2 Taxa Interna de Retorno (TIR).....	43
4.8.3 Payback.....	44
5. RESULTADOS.....	45

5.1 Desempenho Operacional.....	45
5.2 Viabilidade Econômica.....	51
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
7. CONCLUSÃO.....	62
8. REFERÊNCIAS.....	63

1. INTRODUÇÃO

O cultivo de cacau (*Theobroma cacao L.*) é um pilar econômico e cultural no Brasil, posicionado em sexto lugar no ranking de produção mundial (ICCO, 2025), o que se reflete na produção de 297.509 toneladas registrada em 2024 (IBGE, 2024). Essa produção nacional é liderada por dois estados principais, o Pará e a Bahia, responsáveis por, aproximadamente, 96% de todo o cacau produzido no país. A Bahia possui uma área cultivada de pouco mais de 400 mil hectares e 41 mil produtores, distribuídos em todo seu território, com predomínio das lavouras na região Sul do Estado (BRASIL, 2022), destacando-se como o maior polo produtor, responsável por cerca de 70% da produção e por significativa geração de empregos e divisas (SANTOS et al., 2020).

As exigências agronômicas do cacaueiro, como solos argilosos bem drenados (35-40% de argila), pH entre 5,5 e 6,0 e umidade controlada, tornam o preparo do solo uma etapa crucial para garantir o estabelecimento das mudas e a produtividade a longo prazo (EMBRAPA, 2016). A abertura de covas, com dimensões padrão de 40 × 40 × 40 cm, exige precisão para assegurar uniformidade, minimizando perdas de até 20% no pegamento das mudas devido a irregularidades (SOUZA; DIAS, 2017). Solos tropicais, como o Latossolo Vermelho-Amarelo, apresentam desafios adicionais, incluindo compactação e heterogeneidade, que demandam tecnologias adaptadas às condições locais (RAIJ, 2011).

A mecanização agrícola tem transformado a cacaucultura, promovendo eficiência e sustentabilidade ao reduzir custos laborais e otimizar o uso de recursos (SANTOS et al., 2020). As operações manuais, amplamente utilizadas por pequenos produtores, oferecem baixo custo, mas são limitadas por baixa produtividade e impacto ergonômico (LOPES et al., 2019). Operações semi-mecanizadas e mecanizadas, como motocoveadores e equipamentos acoplados a tratores, aumentam a rapidez, mas enfrentam desafios relacionados à variabilidade operacional, influenciada por fatores como textura do solo, umidade e ajustes técnicos (SILVA; OLIVEIRA, 2020). A norma ABNT NBR 16315 (2015) orienta a avaliação de máquinas agrícolas por meio de métricas padronizadas, como tempos de operação e consistência, destacando a necessidade de estudos que comparem diferentes tecnologias em condições de campo (ABNT, 2015). No entanto, a aplicação dessas diretrizes no cultivo de cacau é limitada, especialmente em solos argilosos do sul da Bahia, onde a literatura carece de análises comparativas robustas (SOUZA; DIAS, 2017).

A análise estatística é indispensável para avaliar o desempenho de operações agrícolas, fornecendo métricas exploratórias (ex.: média, variância, CV) e descritivas (ex.: assimetria, curtose) que quantificam eficiência e variabilidade (GOMEZ, 1984). Testes de normalidade, como Anderson Darling e delineamentos experimentais, como o em faixas ao acaso, são fundamentais para garantir a validade das análises em solos tropicais heterogêneos (PIMENTEL, 2009). Apesar disso, poucos estudos integram essas abordagens no contexto do cacau, e a escassez de análises detalhadas sobre variabilidade operacional limita a formulação de recomendações práticas (FERNANDES; CARVALHO, 2019). Lacunas na literatura incluem a falta de comparações entre operações manuais, semi-mecanizadas e mecanizadas, a pouca exploração de fatores operacionais (ex.: treinamento, manutenção) e a ausência de estudos estatisticamente robustos no sul da Bahia (SANTOS et al., 2020).

Este estudo procura avaliar o desempenho operacional de operações agrícolas para abertura de covas para o transplântio de mudas de cacau, utilizando um delineamento em faixas ao acaso e métodos estatísticos avançados. A pesquisa busca comparar a eficiência e a variabilidade das operações, analisar os fatores que influenciam seu desempenho e propor recomendações para diferentes escalas de produção (pequenos, médios e grandes produtores). Ao preencher lacunas na literatura, o estudo contribui para o avanço da mecanização sustentável na cacauicultura, promovendo práticas que otimizem o preparo do solo e fortaleçam a competitividade da região (EMBRAPA, 2016).

2. OBJETIVO GERAL

Analisar comparativamente, sob os aspectos operacional e econômico-financeiro, diferentes sistemas de abertura de covas para o transplântio do cacau, a fim de determinar a tecnologia com maior eficiência e potencial de retorno sobre o investimento.

2.1. Objetivos Específicos

Avaliar o desempenho operacional de diferentes sistemas de abertura de covas no transplântio de mudas do cacau, considerando variáveis como disponibilidade mecânica, eficiência de utilização, eficiência operacional e capacidade de campo operacional.

Avaliar, sob a ótica exclusiva da viabilidade econômico-financeira, diferentes sistemas de coveamento para o transplântio do cacau, identificando, por meio de cenários econômicos e simulação probabilística, quais tecnologias apresentam maior potencial de retorno sobre o investimento.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Cultivo de Cacau e Importância do Preparo do Solo

O cultivo de cacau (*Theobroma cacao* L.) é uma atividade econômica de destaque no Brasil, especialmente no sul da Bahia, que responde por aproximadamente 70% da produção do Estado (SANTOS et al., 2020). O cacaueiro exige condições edafoclimáticas específicas, incluindo solos bem drenados, com textura argilosa (35-40% de argila), pH entre 5,5 e 6,0, e umidade controlada (60-70% da capacidade de campo) (EMBRAPA, 2016). O preparo do solo, etapa inicial do plantio, é fundamental para garantir o desenvolvimento radicular, a absorção de nutrientes e a produtividade, exigindo covas uniformes, geralmente com dimensões de 40 × 40 × 40 cm (RAIJ, 2011). Solos tropicais, como o Latossolo Vermelho-Amarelo predominante na região, apresentam desafios como compactação, heterogeneidade e baixa fertilidade, que podem comprometer a eficiência das operações agrícolas (LOPES et al., 2019).

A uniformidade das covas é crítica para minimizar variações no crescimento das mudas, influenciando diretamente a produtividade e a longevidade do cacaueiro (EMBRAPA, 2016). Covas irregulares podem reduzir a taxa de pegamento das mudas em até 20%, impactando a viabilidade econômica do cultivo (SANTOS et al., 2020). As operações manuais e mecanizadas desempenham papéis distintos na abertura de covas, com diferenças em eficiência, custo e adequação às condições do solo (LOPES et al., 2019). A escolha da ferramenta depende da escala de produção, dos recursos disponíveis e das características do solo, destacando a necessidade de estudos que avaliem o desempenho operacional em contextos regionais (SANTOS et al., 2020).

Embora o cultivo de cacau seja amplamente estudado, há uma lacuna na literatura sobre o desempenho de operações específicas em solos argilosos do sul da Bahia, especialmente em termos de eficiência e variabilidade operacional (EMBRAPA, 2016). Pesquisas que combinem análises práticas com métricas estatísticas robustas são escassas, reforçando a relevância de estudos que investiguem tecnologias de preparo do solo adaptadas às condições locais (SANTOS et al., 2020).

3.2. Mecanização Agrícola no Preparo do Solo

A mecanização agrícola tem transformado o preparo do solo em culturas tropicais, como o cacau, ao aumentar a produtividade e reduzir custos laborais (SANTOS et al., 2020). As operações manuais, como cavadeiras, são amplamente utilizadas por pequenos produtores devido ao baixo custo e à precisão na formação de covas, mas apresentam limitações em eficiência e ergonomia, especialmente em solos compactados (RAIJ, 2011). Operações semi-mecanizadas, como motocoveadores, oferecem um equilíbrio entre mobilidade e potência, sendo ideais para médios produtores em áreas de até 10 hectares (LOPES et al., 2019). Equipamentos mecanizados, como perfuradores acoplados a tratores, são indicados para grandes propriedades, mas requerem investimentos significativos e ajustes operacionais precisos (SANTOS et al., 2020).

Estudos indicam que operações semi-mecanizadas podem reduzir os tempos de operação em até 50% em comparação com métodos manuais, particularmente em solos com umidade controlada (SANTOS et al., 2020). No entanto, equipamentos mecanizados podem apresentar maior variabilidade operacional devido à dependência de fatores como a potência do trator, o tipo de solo e a manutenção (LOPES et al., 2019). Para permitir a comparação entre tecnologias de preparo do solo, a norma ABNT NBR 16315 (2015) estabelece diretrizes para ensaios de máquinas agrícolas. A norma recomenda a avaliação de métricas-chave, como tempos de operação, variabilidade e consistência, e enfatiza a importância de testes padronizados em condições de campo reais (ABNT, 2015).

Apesar dos avanços na mecanização, há poucos estudos específicos sobre o cultivo de cacau que comparem operações manuais, semi-mecanizadas e mecanizadas em solos tropicais (SANTOS et al., 2020). A escassez de análises detalhadas sobre o desempenho operacional, especialmente em solos argilosos do sul da Bahia, reforça a necessidade de pesquisas que combinem avaliações práticas com métodos estatísticos robustos (LOPES et al., 2019).

3.3. Fatores que Afetam o Desempenho de Operações Agrícolas

O desempenho de operações agrícolas no preparo do solo é influenciado por fatores ambientais, técnicos e operacionais (LOPES et al., 2019). A condição do solo, incluindo textura (ex.: 35-40% de argila), umidade (60-70% da capacidade de campo) e compactação, afeta diretamente a eficiência das operações. Solos argilosos podem apresentar camadas endurecidas, dificultando a penetração de instrumentos, enquanto a umidade inadequada pode aumentar a aderência do solo aos equipamentos (RAIJ, 2011). Obstáculos, como raízes ou

pedras, também contribuem para variações no desempenho, aumentando os tempos de operação (SANTOS et al., 2020).

As características desses implementos, como potência, diâmetro de brocas e ergonomia, desempenham um papel crucial. Operações semi-mecanizadas, com motores a combustão, são projetadas para solos moderadamente compactados, enquanto equipamentos acoplados a tratores exigem ajustes precisos de profundidade e velocidade (LOPES et al., 2019). As operações manuais, embora precisas, são limitadas pela fadiga do operador, impactando a consistência em longas jornadas (RAIJ, 2011). Fatores operacionais, como treinamento, manutenção e ajustes durante o uso, influenciam a uniformidade dos resultados, sendo críticos para equipamentos mecanizados (SANTOS et al., 2020).

A literatura aponta que a variabilidade operacional, medida por métricas como variância e Coeficiente de Variação (CV %), é maior em equipamentos mecanizados devido à complexidade dos ajustes (LOPES et al., 2019). No entanto, poucos estudos quantificam esses efeitos no cultivo de cacau, especialmente em solos tropicais, destacando a necessidade de análises que considerem a interação entre solo, ferramenta e operador (SANTOS et al., 2020).

3.4. Estatística Aplicada em Experimentos Agrícolas

A estatística é um pilar fundamental em experimentos agrícolas, fornecendo métodos para quantificar o desempenho, a variabilidade e a consistência de tratamentos, como implementos utilizados no preparo do solo (GOMEZ; GOMEZ, 1984). Métricas exploratórias, como média, mediana, variância, desvio padrão e CV, são amplamente empregadas para descrever variáveis operacionais, como tempos de operação de equipamentos agrícolas. A média indica a tendência central de uma variável, enquanto a variância e o desvio padrão medem a dispersão dos dados em torno dessa tendência (MONTGOMERY; RUNGER, 2019). O CV, definido pela fórmula $CV = \frac{S}{X} \times 100$, onde (s) é o desvio padrão e X é a média, permite comparar a variabilidade relativa entre diferentes tratamentos, sendo particularmente útil em estudos com escalas de tempo ou desempenho distintas (TRIOLA, 2018). Essas métricas são essenciais para avaliar a eficiência e a previsibilidade de tecnologias agrícolas, como operações para abertura de covas (STEEL; TORRIE; DICKEY, 1997).

Métricas descritivas, como os coeficientes de assimetria (g^1) e curtose (g^2), complementam a análise ao caracterizar a forma das distribuições de dados. A assimetria indica o grau de desvio da simetria, com valores positivos sugerindo caudas à direita (ex.:

tempos de operação mais longos) e valores negativos indicando caudas à esquerda (JOANES; GILL, 1998). A kurtosis, por sua vez, mede o achatamento da distribuição, com valores negativos associados a distribuições platicúrticas (mais achatadas) e valores positivos a distribuições leptocúrticas (mais concentradas) (DE CARLO, 1997). Essas medidas são cruciais para avaliar a adequação dos dados a métodos paramétricos, como a análise de variância (ANOVA), que assume normalidade e homogeneidade de variâncias (WALPOLE et al., 2016). Em experimentos agrícolas, distribuições não normais podem surgir devido a fatores como heterogeneidade do solo ou variações operacionais, exigindo métodos não paramétricos, como o teste de Kruskal-Wallis, ou transformações de dados (MONTGOMERY; RUNGER, 2019).

A verificação da normalidade dos dados é uma suposição crítica para a aplicação de métodos paramétricos (GOMEZ; GOMEZ, 1984). Embora testes como o Shapiro-Wilk (S-W) notavelmente eficaz para amostras pequenas ($n < 50$) — e o Kolmogorov-Smirnov (K-S) sejam amplamente utilizados (WALPOLE et al., 2016), este estudo empregou o teste de Anderson-Darling (A-D). O teste A-D é uma alternativa que atribui maior peso às caudas da distribuição, aumentando a sensibilidade a desvios de normalidade nessas regiões críticas. Esta análise foi complementada pela inspeção visual dos gráficos Q-Q plot, que comparam os quantis observados com os quantis teóricos (STEEL; TORRIE; DICKEY, 1997). Em estudos agrícolas, a não normalidade pode ser comum em variáveis operacionais, como tempos de execução de tarefas, devido a fatores ambientais (ex.: compactação do solo) ou técnicos (ex.: ajustes de equipamentos) (PIMENTEL, 2009).

O delineamento experimental é um componente essencial da estatística agrícola, influenciando a validade e a eficiência das análises. O delineamento em faixas ao acaso, comum em experimentos de campo, é projetado para capturar variações espaciais do solo, como diferenças em textura ou fertilidade, permitindo avaliar interações entre tratamentos e blocos (GOMEZ; GOMEZ, 1984). Este delineamento é particularmente adequado para solos tropicais, onde a heterogeneidade é significativa, e aumenta a precisão estatística ao isolar efeitos ambientais (MONTGOMERY; RUNGER, 2019). A randomização, frequentemente implementada por meio de softwares estatísticos, como o R, garante a independência das observações, minimizando vieses sistemáticos (STEEL; TORRIE; DICKEY, 1997). A escolha de delineamentos robustos é crítica para comparar tecnologias agrícolas, como operações de preparo do solo, em condições reais de campo (PIMENTEL-GOMES, 2009).

Para orientar a avaliação de faixas de desempenho e variância em experimentos agrícolas, é necessário estabelecer critérios claros, como os apresentados na Tabela 1. Esses critérios, adaptados de MONTGOMERY & RUNGER (2019) e STEEL, TORRIE & DICKEY (1997), definem faixas de desempenho como os intervalos entre valores mínimos e máximos de uma variável (ex.: tempos de operação) e classificam a variância em níveis baixos, moderado e alto com base em sua relação com a média ao quadrado (x^2). A consistência operacional, caracterizada por um CV baixo ($< 20\%$), reflete a previsibilidade dos resultados, enquanto um CV alto ($> 20\%$) indica maior variabilidade relativa. Esses critérios são fundamentais para interpretar o desempenho de operações agrícolas e orientar recomendações práticas para produtores (STEEL; TORRIE; DICKEY, 1997)

Tabela 1. Critérios para Avaliação de Faixas de Desempenho e Variância no Estudo

Critério	Definição
Faixa de Desempenho	Intervalo entre o valor mínimo e máximo da variável operacional (ex.: tempos de perfuração).
Variância Baixa	Variância $< x^2$, indicando alta consistência operacional.
Variância Moderada	Variância entre x^2 e $2 \times x^2$, sugerindo dispersão moderada.
Variância Alta	Variância $> 2 \times x^2$, indicando alta dispersão.
Consistência Operacional	CV $< 20\%$, resultando em resultados previsíveis e uniformes.
CV Alto	CV $> 20\%$, indicando alta variabilidade relativa.

Fonte: MONTGOMERY; RUNGER, 2019; STEEL; TORRIE; DICKEY, 1997

A literatura destaca que a integração de métricas descritivas, testes de normalidade e delineamentos experimentais robustos é essencial para análises precisas em experimentos agrícolas, mas poucos estudos aplicam essas abordagens de forma combinada (JOANES; GILL, 1998). No contexto do cultivo de cacau, a escassez de análises estatísticas detalhadas sobre o desempenho de operações de preparo do solo reforça a importância de estudos que adotem métodos rigorosos (SANTOS et al., 2020). A aplicação de análises exploratórias, descritivas e testes estatísticos, como os descritos, permite gerar recomendações

fundamentadas para otimizar o preparo do solo, contribuindo para o avanço da pesquisa agrícola em regiões tropicais.

3.5 Estudos de Tempos e Movimentos

O estudo de tempos e movimentos é uma metodologia consolidada para análise sistemática do trabalho, visando determinar o tempo necessário para que um funcionário ou máquina, devidamente treinado ou operada, execute uma tarefa específica em ritmo normal (estudo de tempos) e desenvolva métodos padronizados e otimizados de trabalho (estudo de movimentos) (BARNES, 1977). Essa abordagem permite identificar gargalos no processo produtivo, promovendo maior eficiência operacional.

De modo geral, esses estudos auxiliam na gestão operacional, contribuindo para a resolução de problemas, planejamento, controle e racionalização das operações. Segundo Fenner (2002), a aplicação dessas análises pode aumentar a rentabilidade, seja pelo incremento da produtividade, seja pela redução dos custos de produção. Mialhe (1974) destaca que os estudos de tempos têm como objetivos principais: desenvolver o método mais eficiente, geralmente o de menor custo; padronizar esse método; e determinar o tempo necessário para a execução de uma tarefa em condições normais. Essa abordagem busca otimizar resultados, minimizar ociosidade e aprimorar técnicas para maximizar a eficiência.

A relevância dos estudos de tempos e movimentos está em suas diversas aplicações. Eles permitem decompor uma tarefa em uma série ordenada de movimentos simples, eliminando os desnecessários e simplificando os úteis, o que facilita a determinação do tempo médio para cada atividade (CHIAVENATO, 2003). Na mecanização, esses estudos promovem automação, racionalização e padronização, por meio da adoção de métodos específicos e do uso adequado de equipamentos (BARNES, 1977). Assim, é essencial considerar o desenvolvimento de processos apropriados, avaliar o ritmo de trabalho, determinar tolerâncias e estabelecer tempos padrão, considerando as diferenças entre operações manuais e mecanizadas.

Malinovsk (1983) aponta que a análise de sistemas baseada em estudos de tempos permite ajustar equações para estimar o rendimento de máquinas. Além disso, esses estudos avaliam a viabilidade econômica das operações, considerando a rentabilidade (ROCHA FILHO, 1993). Segundo Mello e Sant'Anna (2000), a análise dos rendimentos operacionais e

dos custos das atividades é crucial para o planejamento eficiente de insumos, máquinas e mão de obra, além de subsidiar a tomada de decisão e a gestão global das atividades.

Em setores agrícolas, como a exploração florestal, a cultura da cana-de-açúcar e a produção de grãos, os estudos de tempos e movimentos já são amplamente utilizados para planejar e otimizar tarefas. A análise do tempo consumido em cada elemento do ciclo de trabalho possibilita a organização das atividades, reduzindo tempos improdutivos e permitindo calcular a produtividade e o custo por unidade produzida, considerando fatores relevantes (SEIXAS; BARBOSA; RUMMEL, 2004).

3.6 Custos Operacionais em Operações Manuais

As operações manuais, como plantio, capina e colheita sem auxílio de máquinas, são caracterizadas pela predominância da mão de obra como principal componente de custo, especialmente em sistemas agrícolas de pequena escala ou em culturas intensivas em trabalho humano. Andrade et al. (2012) estimam que, em culturas como milho e soja, os custos com mão de obra em operações manuais podem representar até 50% do custo operacional total, influenciados por fatores como sazonalidade, qualificação dos trabalhadores e condições edafoclimáticas. Complementando, Santos et al. (2015) destacam que a variabilidade na produtividade do trabalho humano, afetada por fatores como treinamento e condições ergonômicas, pode elevar os custos em até 20% em sistemas manuais mal gerenciados. Eles recomendam a adoção de práticas de gestão de recursos humanos, como capacitação contínua, para otimizar a eficiência.

Mialhe (1996), em sua obra de referência, enfatiza que a gestão do tempo produtivo e improdutivo é essencial para reduzir custos em operações manuais. Ele sugere a utilização de operações manuais otimizadas, como enxadas e plantadores manuais ergonômicos, para minimizar a fadiga e aumentar a produtividade por trabalhador. Corroborando, Lopes et al. (2007) analisam o impacto da ergonomia na eficiência de operações manuais em culturas hortícolas, verificando que operações adaptadas podem reduzir o tempo de execução em até 15%, com reflexos diretos na redução de custos. Além disso, Mialhe (1996) destaca a importância de registros detalhados do tempo de trabalho para identificar ineficiências, como pausas excessivas ou planejamento inadequado.

Peloia e Milan (2010) reforçam a relevância de sistemas de medição de desempenho para o monitoramento de custos em operações manuais. Esses sistemas permitem quantificar o consumo de insumos, como sementes e fertilizantes, e avaliar a produtividade do trabalho, possibilitando a identificação de gargalos operacionais. Complementando, Garcia et al. (2013)

propõem o uso de planilhas eletrônicas e softwares de gestão agrícola para monitorar custos em tempo real, especialmente em pequenas propriedades onde operações manuais predominam. Eles verificaram que a adoção dessas operações pode reduzir os custos operacionais em até 10% ao melhorar a alocação de recursos humanos e materiais. A variabilidade das condições de campo, como topografia e umidade do solo, pode elevar os custos, especialmente em sistemas dependentes de mão de obra sazonal, demandando planejamento rigoroso e estratégias de mitigação.

3.7 Custos Operacionais em Operações Semi mecanizadas e mecanizadas

As operações semi-mecanizadas, que integram máquinas de baixa ou média potência com intervenções manuais, e as operações mecanizadas, que utilizam equipamentos de alta potência e tecnologias avançadas, apresentam uma combinação complexa de custos fixos e variáveis, cuja proporção varia conforme o grau de mecanização. Fernandes et al. (2004) demonstram que sistemas semi-mecanizados, como o plantio direto de batata, reduzem custos com combustíveis e manutenção em comparação com sistemas totalmente mecanizados, mas requerem maior investimento em mão de obra qualificada para ajustes manuais. Eles estimam que os custos variáveis, incluindo combustíveis, lubrificantes e mão de obra, representam 30% a 40% do custo total, dependendo da operação.

Pacheco (2000) propõe uma metodologia consolidada para calcular custos fixos (depreciação, juros, seguros) e variáveis (combustíveis, reparos, mão de obra), destacando que a capacidade operacional, medida em hectares por hora, é um indicador crítico para avaliar a eficiência do conjunto mecanizado. Complementando, Baio et al. (2011) analisam a eficiência energética em sistemas semimecanizados, verificando que a escolha de tratores de baixa potência com implementos adaptados pode reduzir o consumo de combustível em até 20%, impactando diretamente os custos variáveis.

Em operações totalmente mecanizadas, os custos fixos, como depreciação e juros sobre o capital investido, ganham maior relevância devido ao alto custo de aquisição de equipamentos modernos. Oliveira et al. (2009) examinam operações florestais mecanizadas com forwarders, destacando que a interação entre máquina e operador é um fator determinante para os custos. Eles verificaram que a manutenção corretiva, decorrente de condições adversas, pode aumentar os custos em até 25%, enquanto a manutenção preventiva pode reduzir essas despesas significativamente. Corroborando, Molin et al. (2014) analisam o impacto da agricultura de precisão em operações mecanizadas, como a aplicação de insumos

com taxa variável, e concluem que tecnologias como GPS e sensores podem reduzir os custos variáveis em até 15% ao otimizar o uso de combustíveis e fertilizantes.

Peloia e Milan (2010) enfatizam que a adoção de tecnologias de agricultura de precisão, como sistemas de automação e monitoramento, é essencial para reduzir custos em operações mecanizadas, embora o investimento inicial eleve os custos fixos e recomendam a análise da relação custo-benefício para justificar a adoção dessas tecnologias. Complementando, Simioni et al. (2016) investigam o uso de softwares de gestão em operações mecanizadas, verificando que sistemas de apontamento eletrônico, como os descritos por Simova (2019), podem melhorar a eficiência operacional em até 12% ao monitorar o desempenho de máquinas em tempo real. Em operações semi-mecanizadas, a manutenção preventiva é indispensável, como apontado por Santos e Maeda (2008), que estimam que a falta de manutenção adequada pode elevar os custos de reparo em até 30% em sistemas que combinam máquinas e trabalho manual.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Local do Estudo

O estudo foi conduzido no Departamento de Mecanização Agrícola da Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira (CEPLAC), em parceria com a Universidade Federal do Sul da Bahia, campus Jorge Amado, em Itabuna, Bahia. A região apresenta clima tropical úmido (Af, segundo Köppen), com temperatura média anual de 24,5°C, precipitação média de 1.587,5 mm/ano e umidade relativa de 85% (ALVARES et al., 2013). Os solos foram classificados como Latossolo Amarelo (EMBRAPA, 1999).

A análise de custos operacionais foi realizada a partir de um levantamento de dados por meio de entrevista e coleta de informações na empresa Lipetral John Deere, em Teixeira de Freitas - BA, no ano de 2025. Os dados coletados referem-se a preços de compra, custos de reparos e manutenção de maquinários utilizados no transplante do cacau. A metodologia de custos foi baseada na proposta de Pacheco (2000), que os divide em custos fixos (CF) e custos variáveis (CV).

4.2 Descrição dos Sistemas de Coveamento

Sistema Manual

A ferramenta utilizada é um cavador articulado manual (Figura 1), modelo boca de lobo, com cabo de madeira de 1,20 m e peso aproximado de 3,8 kg. É composto por duas pás em aço carbono com pintura anticorrosiva, unidas por um sistema de articulação reforçado. A ferramenta é projetada para a perfuração de buracos com diâmetro aproximado de 15 a 20 cm, sendo sua capacidade operacional dependente das condições do solo e da força física do operador.



Figura 1. Cavador articulado manual

Sistema Semi mecanizado

O equipamento utilizado foi o motocoveador STIHL modelo BT 131, equipado com motor 4-MIX® de 36,3 cm³ de cilindrada, com 1,4 kW (1,9 CV) de potência, velocidade de rotação da broca de 200 rpm, dotado de sistema de amortecimento de vibrações e freio de segurança QuickStop, conforme ilustra a Figura 2.



Figura 2. Motocoveador Stihl BT 131.

Sistema Mecanizado

Trator

A máquina agrícola utilizada foi a JD modelo 5080E TDA – ano 2019 – Proconve MAR-I, equipado com motor de 3 cilindros, com 80 CV de potência, turboalimentado com intercooler, com 21% de reserva de torque, sistema hidráulico com capacidade de 2.140 Kgf, conforme mostra a Figura 3.



Figura 3: JD 5080E TDA

Perfurador hidráulico

O implemento agrícola é um perfurador de solo, projetado para acoplamento no sistema de três pontos de tratores com potência mínima recomendada de 50 CV. A transmissão de força é via eixo cardã conectado à TDF de 540 RPM. O conjunto é equipado com caixa de transmissão com relação de 3:1 em banho de óleo, permitindo o uso de brocas intercambiáveis de 9, 12 ou 18 polegadas e atingindo uma profundidade máxima de perfuração de 1 metro, conforme ilustra a Figura 4.



Figura 4. Perfurador Hidráulico

Para garantir a padronização e a consistência metodológica entre os tratamentos, a profundidade de 40 cm foi controlada, mediante o uso de gabaritos, garantindo a execução controlada da atividade. Nos sistemas semimecanizado e mecanizado, essa medida foi

assegurada por meio de uma marcação de gabarito nos respectivos equipamentos de perfuração.

4.3 Coleta e Análise dos Tempos de Trabalho

Para a análise de eficiência operacional, o estudo de tempos e movimentos seguiu a metodologia de Barnes (1977) na coleta e estruturação dos dados. O ciclo de trabalho foi decomposto em elementos distintos para permitir uma análise pormenorizada da operação. A composição do tempo total de um ciclo, que representa o intervalo desde o início de uma cova até o início da seguinte, está no fluxograma da Figura 5.

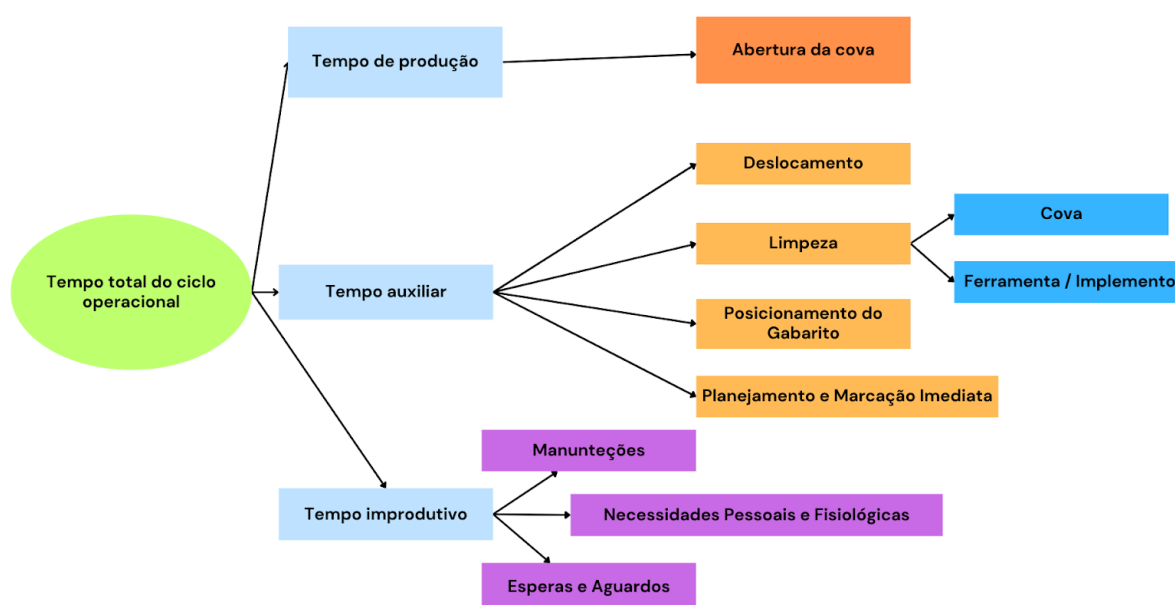


Figura 5. Fluxograma do estudo de tempos e movimentos do ciclo operacional, dividido em Tempo de produção, Tempo Auxiliar e Tempo Improdutivo.

Todas as variáveis foram cronometradas em campo com cronômetros digitais de precisão (0,01 s). Com base nesses registros, a composição do ciclo de trabalho e a proporção de cada elemento (produtivo, auxiliar e improdutivo) foram determinadas conforme a abordagem de Moreira (2000), para a identificação de pontos de consumo de tempo e oportunidades de otimização.

4.4 Delineamento Experimental

A estrutura amostral e o delineamento experimental foram definidos com base na metodologia adaptada de Amorim et al. (2019), que avaliaram o desempenho operacional de

diferentes conjuntos mecanizados por meio de observações repetidas, visando assegurar precisão estatística e representatividade operacional. A adoção de repetições por sistema foi planejada para permitir análise robusta das variáveis operacionais de desempenho, sob condições controladas de campo e em blocos estruturados para minimizar a interferência de fatores externos.

O experimento foi conduzido em um delineamento em blocos ao acaso para controlar a variabilidade do solo. Foram avaliados três tratamentos (MAN: manual, PSM: semimecanizado e MEC: mecanizado), distribuídos em quatro blocos (A, B, C e D). Em cada bloco, cada tratamento contou com oito repetições, totalizando 96 unidades experimentais (ciclos operacionais). A disposição esquemática dos tratamentos é apresentada na Figura 6.

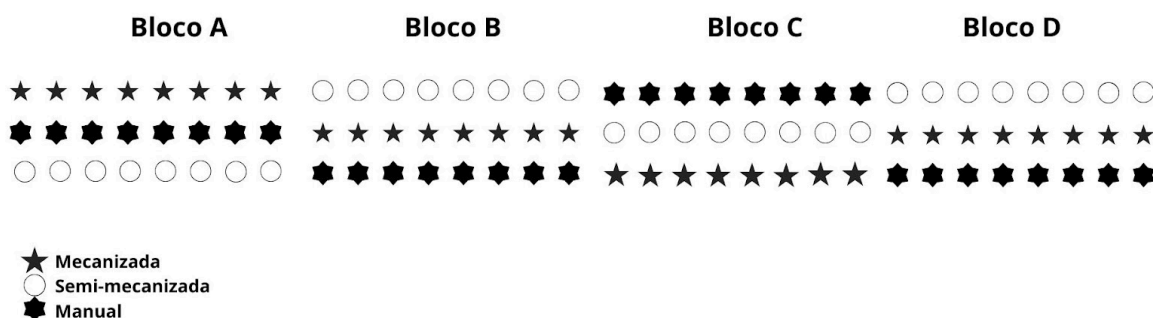


Figura 6. Esquema de distribuição dos tratamentos no Delineamento em Blocos Casualizados com Repetições dentro dos blocos (DBC), adotado no experimento com sistemas de abertura de covas para o cultivo do cacau.

A alocação dos tratamentos dentro de cada bloco foi realizada de forma aleatória, conforme preconizado nas metodologias para experimentos de campo, com o propósito de controlar a variabilidade experimental e garantir a homogeneidade interna dos blocos. Essa estratégia permite aumentar a acurácia das comparações entre os sistemas avaliados, ao reduzir a influência de fatores externos e não controláveis, como variações edafoclimáticas e operacionais (FIEDLER et al., 2008; PELOIA; MILAN, 2010). A aleatorização adequada também assegura a validade estatística do modelo, favorecendo a independência dos erros experimentais e fortalecendo a confiabilidade das inferências obtidas a partir da análise dos dados.

4.5 Análise Estatística

A caracterização do conjunto de dados foi iniciada por meio de uma detalhada análise estatística exploratória. Primeiramente, calcularam-se as medidas de tendência central (média

e mediana) para identificar o ponto central de concentração dos resultados. A variabilidade e a dispersão dos dados foram quantificadas por meio do cálculo dos valores mínimo e máximo, da amplitude, da variância, do desvio padrão (DP) e do coeficiente de variação (CV), sendo este último especialmente útil para avaliar a precisão experimental e comparar a dispersão relativa entre as variáveis.

Para uma compreensão aprofundada da forma da distribuição de frequência, foram analisados os coeficientes de assimetria, que indica o grau de desvio ou afastamento da simetria de uma curva, e de curtose, que mede o nível de achatamento ou "pico" da curva em relação a uma distribuição normal padrão (MIALHE, 1974).

Como pré-requisito fundamental para a aplicação de testes paramétricos, a aderência dos dados à distribuição normal foi rigorosamente verificada. Para essa finalidade, empregou-se o teste de Anderson-Darling, método escolhido por sua reconhecida sensibilidade e poder na detecção de desvios da normalidade, especialmente em experimentos com amostras de tamanho moderado a grande (STEPHENS, 1974). Nos casos em que o pressuposto de normalidade não foi atendido, os dados originais foram submetidos à transformação por logaritmo natural ($\ln(x)$), um procedimento que visa estabilizar a variância e aproximar a distribuição à normalidade.

Posteriormente, os dados (transformados, quando necessário) foram submetidos à análise de variância (ANOVA). O teste F foi utilizado para determinar a existência de diferenças estatisticamente significativas entre as médias dos tratamentos. Quando o teste F se mostrou significativo, indicando que pelo menos uma média difere das demais, procedeu-se com o teste de Tukey para comparações múltiplas, a fim de identificar especificamente quais médias eram diferentes entre si. Para todas as análises inferenciais, foi adotado um nível de significância de 5% ($p < 0,05$).

As análises estatísticas foram conduzidas com o auxílio de pacotes computacionais especializados. A análise descritiva e os testes de normalidade foram realizados no software Minitab®, enquanto a análise de variância e as comparações de médias foram processadas no software AgroEstat®.

4.6 Desempenho Operacional

4.6.1 Definição dos Tempos de Trabalho

O número mínimo de ciclos operacionais foi determinado por um estudo piloto com 10 ciclos por sistema, visando um erro amostral máximo de 5% e confiança de 95%, conforme a Equação 1 (Fiedler et al., 2008):

$$n > \frac{(t^2 \times CV^2)}{E^2} \quad (1)$$

Onde:

n : número mínimo de observações;

t : 1,96 (valor da distribuição t de Student, para 95% de confiança);

CV : coeficiente de variação (%)

E: 0,05 (erro amostral admissível).

O tempo produtivo foi cronometrado durante a operação estável de abertura das covas. O tempo improdutivo englobou atividades auxiliares (limpeza e remoção de resíduos) e manobras (deslocamentos e ajustes). As médias obtidas fundamentaram o cálculo da capacidade de campo e do rendimento dos sistemas avaliados.

4.6.2 Disponibilidade Mecânica (Dm)

A disponibilidade mecânica, que indica a porcentagem de tempo em que o equipamento esteve apto a operar, foi calculada conforme Simões, Iamonti e Fenner (2010):

$$Dm = \left(\frac{T_{prod}}{(T_{prod} + T_{rep})} \right) 100 \quad (2)$$

Onde:

Dm : disponibilidade mecânica (%);

Tprod : tempo produtivo (horas);

Trep : tempo de reparos e manutenção (horas).

4.6.3 Eficiência de Utilização (Eu)

A eficiência de utilização (Simões e Silva, 2012) representa a proporção do tempo total em que o equipamento operou (produtivo ou auxiliar). Conforme a Equação 3, essa

métrica relaciona as horas utilizadas ao tempo disponível, sendo reduzida pelos períodos de inatividade ou tempo improdutivo.

$$Eu = \left(\frac{T_{prod} + T_{aux}}{T_{tot}} \right) 100 \quad (3)$$

Onde:

Eu : eficiência de utilização (%);

T_{prod} : tempo produtivo (horas);

T_{aux} : tempo auxiliar (horas);

T_{tot}: tempo total (horas);

4.6.4 Eficiência Operacional (Eo)

A eficiência operacional, calculada conforme Oliveira, Seixas e Batista (2009), expressa o percentual do tempo efetivamente trabalhado em relação ao tempo total programado, considerando tanto as atividades produtivas quanto auxiliares. Essa eficiência é obtida por meio da (Equação 4).

$$Eo = \left(\frac{T_{prod}}{T_{prod} + T_{aux}} \right) \times 100 \quad (4)$$

Onde:

Eo : eficiência operacional (%):

T_{prod}: tempo produtivo (horas);

T_{aux} : tempo auxiliar (horas).

A velocidade média de deslocamento foi obtida por meio da cronometragem do tempo necessário para percorrer cada faixa horizontal da área de trabalho.

4.6.5 Capacidade de Campo Efetiva (CcE)

A estimativa da capacidade de campo baseou-se na metodologia proposta por Mialhe (1974). Para o cálculo da capacidade de campo efetiva, consideraram-se a largura útil de trabalho e a velocidade média de deslocamento (Equação 5).

$$CcE = \frac{(Le \times Ve)}{10} \quad (5)$$

em que,

CcE - capacidade de campo efetiva (h ha^{-1});

Le - largura efetiva de trabalho (m);

Ve - velocidade efetiva de trabalho (km h^{-1}).

4.6.6 Capacidade de Campo Operacional (CcO)

A capacidade de campo operacional reflete a taxa de trabalho real da máquina em condições de campo. O cálculo, baseado nos conceitos de tempos e movimentos detalhados por Mialhe (1974), é obtido pela razão entre a área total trabalhada e a soma de todos os tempos despendidos na operação (produtivo, auxiliar e improdutivo), (Equação 6).

$$CcO = \left(\frac{A}{T_{pro} + T_{aux} + T_{imp}} \right) \times 100 \quad (6)$$

em que,

CcO – capacidade de campo operacional (h ha^{-1});

A - área subsolada (ha);

Tpro - tempo produtivo (horas);

Taux - tempo auxiliar despendido com manobras e abastecimento do tanque de fertilizante (horas);

Timp - tempo improdutivo despendido com interrupções operacionais, manutenção e necessidades fisiológicas (horas).

4.6.7 Rendimento de Campo Efetivo (RcE)

Para avaliar a eficiência da operação, calculou-se o Rendimento de Campo Efetivo (RcE), conforme apresentado na Equação 7. Este indicador, baseado nos conceitos de Mialhe (1974), quantifica o impacto das interrupções ao expressar, em porcentagem, quanto da capacidade de campo teórica (efetiva) foi de fato alcançada na prática.

$$RcE = \left(\frac{CcO}{CcE} \right) \times 100 \quad (7)$$

em que,

RcE – rendimento de campo efetivo (h ha^{-1});

CcO – capacidade de campo operacional (h ha^{-1});

CcE - capacidade de campo efetiva (h ha^{-1}).

4.7 Viabilidade econômica operacional

A análise da viabilidade econômica baseou-se na metodologia adaptada de Mialhe (1974), que preconiza a divisão dos custos operacionais em fixos e variáveis, permitindo uma apuração precisa dos gastos envolvidos nos sistemas de coveamento.

4.7.1 Custos Fixos (CF)

Os custos fixos são aqueles que ocorrem independentemente do uso da máquina, sendo também denominados custos da propriedade. A partir da aquisição do equipamento, ele passa a gerar despesas mesmo quando permanece inativo. Nesse grupo incluem-se: depreciação (D), juros (J), alojamento e seguros (AS) e salário do tratorista (ST), conforme a Equação 9.

$$CF = D + J + AS + ST \quad (9)$$

4.7.2 Depreciação (D)

Segundo Mialhe (1974), a depreciação de máquinas agrícolas é a redução do valor do bem causada pelo desgaste natural do tempo ou pela falta de uso. Para este estudo, o custo horário com a depreciação (D) foi calculado conforme a Equação 10:

$$D = \left[\frac{(VI - VF)}{L} \right] \left(\frac{1}{n} \right) \quad (10)$$

Onde:

D = custo horário com depreciação ($\text{R}\$. \text{h}^{-1}$);

VI = valor inicial da máquina;

VF = valor final da máquina;

L = vida útil em anos;

N = número de horas de uso da máquina/ano.

4.7.3 Juros (J)

Os juros sobre o capital investido foram calculados utilizando a Equação 11, que considera o valor de aquisição (VI) e o valor final (VF) do trator. A taxa anual de juros (TJ) foi fixada em 8.63%, conforme estabelecido pela Resolução CMN nº 5235/2025 (BRASIL, 2025).

$$J = \left[\frac{(VI + VF)}{2} \right] \left(\frac{T_j}{100} \right) \left(\frac{1}{N} \right) \quad (11)$$

Onde:

J = parcelas de juros, anual;

VI = valor de aquisição (R\$);

VF= valor final (10% do Vi);

TJ = taxas de juros (%);

N = número de horas de uso da máquina/ano.

Para compor os custos operacionais, os parâmetros técnicos e econômicos dos equipamentos, valor de aquisição (VI), vida útil (L) em anos e carga horária anual (N), foram obtidos em fontes especializadas. Para o trator, utilizaram-se dados do Agrianual, enquanto as informações dos demais implementos foram extraídas dos manuais dos fabricantes. Considerando que a vida útil econômica varia conforme o uso e a manutenção, adotaram-se valores de referência tabelados para padronizar a análise (Tabela 2).

Tabela 2 - Dados de valor de aquisição, vida útil estimada e horas trabalhadas/ano das máquinas.

Máquina e Implemento	VI (R\$)	V.U. (Anos)	N (h ⁻¹)
Trator JD 5080e TDA	303.000	10	2.000
Perfurador PSH Baldan	10.500	10	2.000
Perfurador BT 131 Sthil	6.500	2	1.000
Cavadeira de Boca	200	1	500

JD: John Deere; V.I: Valor inicial; V.U: Vida útil; N: Hora útil anual.

Os valores sugeridos por Pacheco (2000) para alojamento e seguros de máquinas variam de 0,75% a 1% do custo inicial ao ano. Sendo assim, foi utilizada uma taxa de 2% ao ano para os cálculos do custo com alojamento e seguro, como mostra a equação 12.

$$A = \frac{(T_a / 100) \cdot VI}{N} \quad (12)$$

Onde:

A= custo horário com alojamento (U\$.h⁻¹);
 Ta = percentual (0,5%) sobre o valor de aquisição do bem.
 VI = valor inicial da máquina;
 N = número de horas de uso da máquina/ano.

4.7.4 Seguro (S)

O custo anual com o seguro foi determinado por meio da Equação 13, considerando uma alíquota de 2% sobre o valor inicial (VI) da máquina. Tal custo é incluído para mitigar os riscos financeiros associados a eventuais danos que possam ocorrer ao maquinário.

$$S = \frac{(T_s/100).VI}{N} \quad (13)$$

Onde:

S = custo horário com seguro (U\$.h⁻¹);
 Ts = percentual (2,0%) sobre o valor de aquisição do bem;
 VI = valor inicial da máquina;
 N = número de horas de uso da máquina/ano.

4.7.5 Salário do tratorista (ST)

O salário do operador, bem como outros benefícios e encargos sociais, referentes à mão-de-obra, devem ser computados no cálculo do custo operacional de máquinas, considerando-se no mínimo a média que prevalece na região. Também podem ser calculados conforme as equações 14 e 15.

$$\text{Salário mensal} = 1,5 \times \text{salário mínimo} + 20\% \text{ de encargos sociais} \quad (14)$$

$$ST \text{ (U\$/h)} = (\text{salário mensal} \times 13) / \text{horas de uso por ano} \quad (15)$$

Diferentemente do que é proposto por Pacheco (2000), este custo foi considerado um custo fixo já que o operador de máquinas pertence ao quadro de funcionários de uma empresa.

4.7.6 Custos Variáveis (CV)

Os custos variáveis ou operacionais são aqueles que dependem do uso da máquina, e são constituídos por: combustíveis (C), lubrificantes (L) e reparos e manutenção (RM). Foi calculado conforme a equação 16.

$$CV = C + L + RM \quad (16)$$

4.7.7 Combustíveis (C)

A determinação do custo horário com combustível seguiu a metodologia de Mialhe (1974), conforme detalhado na Equação 17. Para a estimativa do consumo volumétrico (L/h), considerou-se a premissa de Pacheco (2000), que aponta a dificuldade de medição precisa em campo devido às condições variáveis de carga. Assim, na ausência de dados do fabricante, foi adotado um consumo de referência para o óleo diesel entre 0,15 litros por hora para cada cavalo (cv) de potência exigido na barra de tração. Os preços utilizados nos cálculos foram baseados em valores médios da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2025) para a região de Teixeira de Freitas/BA, sendo R\$5,80 por litro de diesel e R\$6,85 por litro de gasolina.

$$CHC = P_c \cdot GH \quad (17)$$

Onde:

CHC = custo horário de combustível (U\$ h⁻¹);

P_c = preço do combustível (U\$ L⁻¹);

GH = consumo horário de combustível (Lh⁻¹).

4.7.8 Lubrificantes (L)

No cálculo de custo com lubrificantes do trator e do perfurador automotriz, foi utilizada uma estimativa de 20% dos gastos com combustíveis, conforme equação 18.

$$L = PL \times CHC \quad (18)$$

Onde:

L = custo com lubrificantes (U\$ h⁻¹);

PL = percentual (0,2%) estimado de gastos com combustíveis;

CHC = custo horário de combustível (U\$ h⁻¹);

4.7.9 Reparos e manutenção (RM)

Para o cálculo dos custos de manutenção, utilizou-se a Equação 19, cujo componente principal é o Fator de Reparo (FR). Este coeficiente representa o custo total de manutenção ao longo da vida útil da máquina, sendo teoricamente influenciado por múltiplas variáveis, como as condições de trabalho, a habilidade do operador e a qualidade da conservação.

Para a aplicação prática neste estudo, em vez de mensurar cada uma dessas variáveis, adotou-se o valor empírico consolidado por Mialhe (1974) que recomenda para tratores e perfuradores um percentual fixo de 10% sobre o valor inicial (VI) do equipamento para estimar este custo agregado.

$$M = \frac{(T_m / 100).VI}{N} \quad (19)$$

Onde:

M = custo horário com manutenção (U\$.h⁻¹);

T_m = percentual sobre o valor de aquisição do bem;

VI = valor inicial da máquina (U\$);

N = número de horas de uso da máquina/ano (h).

4.7.10 Determinação dos Custos Horário e Operacional

A consolidação de todos os componentes de despesa levantados permitiu o cálculo de dois indicadores-chave de desempenho econômico: o Custo Horário (CH) e o Custo Operacional (CO). Primeiramente, o Custo Horário (CH) foi estabelecido através da Equação 20. Ele representa o custo total de se manter e operar uma máquina por uma hora de trabalho, sendo composto pela soma de seus custos fixos (independentes do uso) e variáveis (dependentes do uso).

$$CH = J + D + A + S + MO + CHC + M + CLG \quad (20)$$

Onde:

CH = custo horário (U\$ h⁻¹);

J = custo com juros (U\$ h⁻¹);

D = custo com depreciação ($\text{U\$ h}^{-1}$);
 A = custo com alojamento ($\text{U\$ h}^{-1}$);
 S = custo com seguros ($\text{U\$ h}^{-1}$);
 MO = custo com mão-de-obra ($\text{U\$ h}^{-1}$);
 CHC = custo com combustível ($\text{U\$ h}^{-1}$);
 M = custo com manutenção ($\text{U\$ h}^{-1}$);
 CLG = custo com lubrificantes e graxas ($\text{U\$ h}^{-1}$).

Em seguida, o Custo Operacional (CO) foi calculado para traduzir o custo-horário em um custo por área, refletindo a eficiência da operação. Conforme a Equação 21, este valor é obtido pela razão entre o Custo Horário (CH) e a Capacidade de Campo Operacional (Cco) do sistema.

$$CO = CH / Cco \quad (21)$$

Onde:

CO = Custo Operacional ($\text{U\$ ha}^{-1}$)
 CH = Custo Horário ($\text{U\$ h}^{-1}$)
 Cco = Capacidade de Campo Operacional (ha h^{-1})

4.8 Análise de Viabilidade Econômico-Financeira

Para determinar a atratividade do investimento na aquisição do maquinário no contexto de uma lavoura de cacau, foi conduzida uma detalhada análise de viabilidade econômico-financeira. A metodologia projeta o fluxo de caixa do projeto ao longo de um horizonte de 10 anos, um período selecionado para abranger não apenas a fase de implantação, mas também todo o ciclo produtivo de uma lavoura de cacau de alta tecnologia. O estudo se concentra em uma área de 20 hectares em sistema a pleno sol.

O ponto de partida da análise foi o robusto investimento inicial (I_0), que ocorre no primeiro ano do projeto. Este desembolso inclui tanto o valor de aquisição das máquinas quanto o custo para a formação da lavoura, estimado em $\text{U\$ 55.333,18..}$ Ao longo dos anos subsequentes, o fluxo de caixa considerou os custos operacionais anuais (fixos e variáveis) e a projeção de receitas, que foi modelada para refletir o ciclo de vida da lavoura, com produção iniciando no terceiro ano e estabilizando em um patamar de 120 arrobas por hectare a partir do sexto ano. Para a valorização, adotou-se um preço médio conservador de $\text{U\$55,33}$ por arroba, a fim de mitigar os riscos da volatilidade do mercado.

A Taxa Mínima de Atratividade (TMA), que representa o custo de oportunidade do capital, foi fixada em 25% ao ano. Este valor é compatível com investimentos agrícolas de risco moderado a elevado, conforme apontado por Vergara et al. (2025) e Corrêa et al. (2019). Esta taxa é o parâmetro fundamental para trazer os fluxos de caixa futuros a valor presente e avaliar a viabilidade do projeto através dos seguintes indicadores:

4.8. 1 Valor Presente Líquido (VPL)

No método do Valor Presente Líquido, os valores do fluxo de caixa são trazidos a valor presente com base na Taxa Mínima de Atratividade. Se o VPL for positivo, o projeto é considerado viável, pois indica que o retorno supera o valor do investimento e a rentabilidade mínima exigida. Conforme Vergara et al. (2017a), entre diversas alternativas, a mais vantajosa será aquela com o maior VPL positivo. O cálculo do VPL é representado pela Equação 22:

$$VPL = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FCt}{(1+K)^t} + \frac{VR}{(1+K)^n} \quad (22)$$

Onde: VPL = valor presente líquido;

FCt = fluxos de entrada previstos para cada período t do projeto;

n = número de períodos analisados;

I₀ = investimento inicial;

K = taxa de juros ou custo de capital (TMA);

VR = valor residual ao final do projeto.

4.8.2 Taxa Interna de Retorno (TIR)

A Taxa Interna de Retorno é a taxa de desconto que torna o VPL igual a zero, representando a rentabilidade intrínseca do projeto. Se a TIR for superior à TMA, o investimento é considerado atrativo. Segundo Vergara, Teixeira e Yamanari (2017b), a TIR é um dos métodos mais utilizados por facilitar a interpretação dos resultados, igualando o valor presente das saídas e entradas de caixa esperadas. A equação 23 que define a TIR é representada por:

$$I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{I_t}{(1+K)^t} = \sum_{t=1}^n \frac{FCt}{(1+K)^t} \quad (23)$$

Onde:

I_0 = investimento inicial no instante zero;

I_t = investimentos adicionais ao longo dos períodos t ;

K = taxa interna de retorno (TIR);

n = número de períodos avaliados;

FC_t = fluxos de entrada de caixa previstos em cada período do projeto.

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é a taxa de desconto que torna o valor presente das receitas igual ao valor presente dos desembolsos. Em outras palavras, é a taxa que anula o VPL de um projeto, também conhecida como taxa de remuneração do capital investido. Ela representa a rentabilidade do projeto e corresponde à taxa que equilibra os fluxos de entrada e saída de caixa, resultando em VPL igual a zero.

Segundo Vergara, Teixeira e Yamanari (2017b), a TIR é um dos métodos mais utilizados na análise de viabilidade de investimentos, por permitir identificar a taxa que iguala o valor presente das saídas e entradas de caixa esperadas, facilitando a interpretação dos resultados pelos analistas.

4.8.3 Payback

O tempo de recuperação do capital investido, conhecido como Payback, é um indicador que mede o período necessário para que o investimento inicial seja recuperado (Vergara et al., 2021). Do ponto de vista econômico, quanto menor for o tempo de retorno, mais atrativo é o projeto. O Payback pode ser estimado multiplicando-se o número de anos do projeto pela razão entre o valor presente dos investimentos e o valor presente dos lucros, conforme Equação 24.

$$PB = \frac{PVL(Investimento)}{PVL(lucros)} \times anos \quad (24)$$

5. RESULTADOS

5.1 Desempenho Operacional

Para garantir a robustez e a representatividade dos dados nesta análise, a metodologia de tempos e movimentos foi empregada seguindo os preceitos de amostragem descritos por Barnes (1977), onde um número maior de observações confere maior fidedignidade aos resultados. O total de ciclos operacionais observados durante o estudo superou significativamente a amostragem mínima necessária para um erro admissível de 5%, conferindo alta confiabilidade à análise.

Para uma avaliação aprofundada do desempenho e da eficiência de cada sistema de abertura de covas, foi adotada a metodologia de estudo de tempos e movimentos, segmentando o ciclo operacional em quatro categorias distintas. O Tempo Produtivo (*T_{pro}*) foi definido como o tempo efetivamente gasto na execução da tarefa principal, ou seja, a perfuração da cova. Os Tempos Auxiliares (*T_{aux}*) compreenderam as atividades de suporte que, embora necessárias, não agregam valor direto à tarefa, como a limpeza da broca ou a retirada de detritos do solo. O Tempo Improdutivo (*T_{imp}*) foi associado aos deslocamentos do operador ou do maquinário entre os pontos de perfuração. Por fim, as interrupções (*T_{int}*) registraram o tempo de pausas por necessidades fisiológicas ou outras paradas não relacionadas à operação.

Essa estratificação detalhada do ciclo de trabalho é fundamental para identificar com precisão os desafios operacionais e os fatores que impactam a eficiência global dos sistemas Manual (MAN), Motocoveador (PSM) e Mecanizado (MEC), cujos resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Análise descritiva dos tempos (ha h^{-1}) dos componentes do ciclo operacional de abertura de covas, por sistema

¹ Variáveis	Sistemas	X	DP	CV (%)	Min.	Med.	Max.	Cs.	Ck.	AD
<i>T_{prod.}</i>	MAN	0,03	0,01	14,44	0,02	0,03	0,04	1,01	1,21	0,52 ^N
	PSM	0,01	0,00	31,56	0,01	0,01	0,02	0,94	0,86	0,53 ^N
	MEC	0,02	0,01	33,03	0,01	0,02	0,03	0,63	-0,97	1,75 ^A
<i>T_{aux}</i>	MAN	0,01	0,00	27,22	0,00	0,01	0,02	0,31	0,27	0,48 ^N
	PSM	0,01	0,00	39,05	0,00	0,01	0,02	0,89	0,33	0,63 ^N
	MEC	0,00	0,00	31,16	0,00	0,00	0,00	0,43	-0,02	0,76 ^N
<i>T_{imp}</i>	MAN	0,00	0,00	57,79	0,00	0,00	0,00	3,03	9,44	4,91 ^A
	PSM	0,00	0,00	60,14	0,00	0,00	0,00	2,71	7,86	3,79 ^N
	MEC	0,00	0,00	55,64	0,00	0,00	0,00	0,47	-1,43	1,91 ^A
<i>T_{int}</i>	MAN	0,00	0,00	14,51	0,00	0,00	0,00	0,00	-2,14	5,58 ^A
	PSM	0,00	0,00	15,15	0,00	0,00	0,00	-1,13	0,87	2,71 ^N
	MEC	0,00	0,00	22,28	0,00	0,00	0,00	-0,11	-0,58	0,55 ^N
<i>T_{tot}</i>	MAN	0,04	0,00	13,51	0,03	0,04	0,06	0,84	1,92	0,38 ^N
	PSM	0,02	0,00	26,63	0,01	0,02	0,05	0,71	0,26	0,86 ^N
	MEC	0,02	0,00	29,49	0,01	0,02	0,04	0,42	-1,32	1,29 ^A

X: Média; DP: desvio-padrão; var.: variância; CV (%): Coeficiente de Variação; Mín.: Mínimo; Med.: Mediana; Máx.: Máximo; Cs: Coeficiente de Assimetria; Ck: Coeficiente de Kurtosis; AD: Normalidade de Anderson Darling. (ha h^{-1} : hectare por hora). A: Anormal; N: Normal.

O indicador primário de desempenho operacional, o tempo total (T_{tot}), evidencia uma superioridade dos sistemas PSM e MEC. Com um dispêndio médio de 0,02 horas por hectare (h.ha^{-1}), os sistemas MEC e PSM reduzem o tempo de trabalho em 50% quando comparados ao sistema MAN ($0,04 \text{ ha h}^{-1}$). Tal ganho de eficiência operacional está em plena consonância com Leite et al. (2019), ao avaliarem o plantio de eucalipto, documentaram um aumento de produtividade de 43% ao substituir o método manual por um perfurador de solo mecanizado, corroborando a magnitude do avanço observado.

O Coeficiente de Variação (CV%) expõe a vantagem do sistema mecanizado de forma ainda mais expressiva. Com um CV de apenas 13,51%, a operação mecanizada demonstra alta estabilidade e, portanto, previsibilidade, um atributo essencial para o dimensionamento de recursos e o cumprimento de metas. Em acentuado contraste, a variabilidade dos sistemas manual (26,65%) e semimecanizado (29,49%) é maior. Essa dispersão é inerente a processos com elevada dependência do fator humano, sujeitos a variações de ritmo, habilidade e fadiga. Conforme postulado por Machado (2014), um dos principais pilares da mecanização é a

¹ Os valores foram mantidos em ha h^{-1} com duas casas decimais para assegurar a padronização com os demais indicadores operacionais. Onde o valor consta como 0,00, indica que a grandeza é inferior a $0,005 \text{ ha h}^{-1}$, não exercendo impacto estatístico significativo no cálculo da capacidade de campo.

padronização do trabalho, que viabiliza uma gestão mais acurada e previsível das operações florestais.

A desagregação do ciclo de trabalho em tempos elementares aprofunda a análise. O tempo efetivamente produtivo (*T_{prod}*) do sistema manual é significativamente superior, enquanto tempos auxiliares (*T_{aux}*), frequentemente associados a pausas e preparações menores, são exclusivos dessa modalidade. Inversamente, o sistema mecanizado introduz tempos de manobra (*T_{imp}*), que, embora marginais na média, são componentes intrínsecos ao seu ciclo. A análise técnica de Faria et al. (2013) sobre o desempenho de perfuradores mecanizados detalha precisamente como a topografia e a perícia do operador na execução de manobras influenciam o rendimento geral, validando a complexidade do ciclo operacional mecanizado.

O estudo de tempos e movimentos, conforme destacado por Loffler (1982) para operações florestais, é uma ferramenta metodológica fundamental para a análise de desempenho operacional. O Coeficiente de Variação (CV) para a velocidade do sistema mecanizado (MEC) foi um dos pontos mais proeminentes da análise, atingindo 52,93% (Tabela 2), um forte indicativo de heterogeneidade na operação. Essa alta dispersão nos dados de velocidade compromete diretamente a fluidez do processo, gerando um ritmo de produção inconstante e dificultando o planejamento das etapas logísticas subsequentes.

Segundo Machado (2014), CV em operações de colheita florestal acima de 30% são considerados muito altos, indicando que a operação possui baixa regularidade e previsibilidade. Tal instabilidade operacional não apenas impacta a produtividade, mas também pode resultar em um aumento dos custos, seja pelo consumo de combustível irregular ou pelo desgaste prematuro de componentes mecânicos. Essa variabilidade é fortemente influenciada por fatores como a habilidade do operador, a topografia do terreno e a presença de obstáculos. Por exemplo, a imperícia do operador pode levar a hesitações e correções de rota, enquanto um terreno acidentado força constantes alterações de marcha e velocidade, inflando o valor do CV.

Tabela 4. Análise estatística descritiva para os indicadores de tempo e desempenho operacional.

² Variáveis	Sistemas	X	DP	CV (%)	Min.	Med.	Max.	Cs.	Ck.	AD
Velocidade (ha h ⁻¹)	MAN	1,06	0,35	32,46	0,29	1,08	1,62	-0,02	0,42	2,19 ^A
	PSM	0,87	0,34	38,77	0,23	0,95	1,62	0,04	0,16	1,41 ^A
	MEC	0,947	0,50	52,93	0,36	0,95	1,62	0,29	-1,52	1,87 ^A
CcO ha h ⁻¹	MAN	0,21	0,03	13,92	0,14	0,21	0,27	0,08	0,29	0,51 ^N
	PSM	0,37	0,10	27,87	0,19	0,38	0,59	0,39	-0,48	0,59 ^N
	MEC	0,41	0,12	29,23	0,24	0,41	0,59	-0,06	-1,71	1,55 ^A
Eo (%)	MAN	96,75	1,95	2,02	89,62	97,18	98,20	-3,05	9,55	4,20 ^A
	PSM	91,46	3,79	4,15	80	92,03	96,74	-1,51	2,99	1,07 ^N
	MEC	94,21	2,06	2,18	89,41	94,44	96,75	-0,8	-0,22	1,01 ^N
T_{tot} (ha h ⁻¹)	MAN	0,04	0,00	13,51	0,03	0,04	0,06	0,84	1,92	0,38 ^N
	PSM	0,02	0,00	26,63	0,01	0,02	0,05	0,71	0,26	0,86 ^N
	MEC	0,02	0,00	29,49	0,01	0,02	0,04	0,42	-1,32	1,29 ^A

X: Média; DP: desvio-padrão; var.: variância; CV (%): Coeficiente de Variação; Mín.: Mínimo; Med.: Mediana; Máx.: Máximo; Cs: Coeficiente de Assimetria; Ck: Coeficiente de Kurtosis; AD: Normalidade de Anderson Darling. (ha h⁻¹: hectare por hora). A: Anormal; N: Normal.

Em contrapartida, o sistema Manual (MAN) destacou-se pela alta Eficiência Operacional (Eo) de 96,75% e pela notável estabilidade, com um CV para este parâmetro de apenas 2,02%. Este resultado alinha-se com estudos como o de SANTOS et al. (2018), que, ao avaliarem diferentes sistemas de colheita florestal, observaram que operações manuais ou semi mecanizadas tendem a ter maior eficiência por minimizarem perdas de tempo com deslocamentos longos, ou manobras complexas.

No entanto, a mesma literatura aponta que a capacidade física do trabalhador é um fator limitante. Isso é confirmado na Tabela 3 pelo Tempo Total (T_{tot}) de (0,04 ha h⁻¹), o dobro dos sistemas motorizados, evidenciando que a eficiência no ritmo de trabalho não se traduz em maior rendimento final. O motocoveador (PSM) representa um equilíbrio técnico. A drástica redução do Tempo Total (0,02 h ha⁻¹) em comparação com o sistema manual demonstra o significativo ganho de rendimento proporcionado pela motorização.

Conforme aponta Silva et al. (2013), a introdução de ferramentas motorizadas portáteis, como os motocoveadores, é uma estratégia fundamental para aumentar a produtividade da mão de obra em atividades onde a mecanização total é técnica ou economicamente inviável. A pequena queda na eficiência operacional (91,46%) é uma troca

² Os valores foram mantidos em ha h⁻¹ com duas casas decimais para assegurar a padronização com os demais indicadores operacionais. Onde o valor consta como 0,00, indica que a grandeza é inferior a 0,005ha h⁻¹, não exercendo impacto estatístico significativo no cálculo da capacidade de campo.

esperada e aceitável, geralmente atribuída a pequenas paradas para manutenção e reabastecimento.

A análise detalhada dos tempos do ciclo operacional (Tabela 5) é uma ferramenta gerencial fundamental. Ela possibilita a identificação precisa de gargalos e serve de base para o cálculo de indicadores de desempenho. Como ressalta Peloia e Milan (2010), esse sistema de medição integrado é essencial para controlar a operação e apoiar decisões estratégicas e operacionais.

Tabela 5. Estimativa da disponibilidade mecânica, eficiência de utilização e eficiência operacional.

Tratamentos	Disponibilidade mecânica (%)	Eficiência de utilização (%)	Eficiência operacional (%)
MAN	97,60a	87,55a	96,75a
PSM	95,32b	87,95a	91,46c
MEC	94,82b	85,86b	94,21b
DMS (%)	1,03	1,58	1,52
F	22,99	5,59	34,09
CV (%)	1,81	3,04	2,72

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

A eficiência operacional média obtida, considerando todos os sistemas em conjunto, foi de 94%. A eficiência operacional em atividades agrícolas mecanizadas deve situar-se entre 70% e 90% para ser considerada adequada. Valores que ultrapassam o limite superior dessa faixa são caracterizados como altos, indicando um desempenho excepcional da operação.

A Tabela 6 apresenta os valores médios de velocidade média de deslocamento (VM), capacidade de campo efetiva (CcE), capacidade de campo operacional (CcO) e rendimento de campo efetivo (RcE) para os diferentes sistemas avaliados. Observa-se que o sistema MEC apresentou desempenho superior em relação aos demais, com destaque para os maiores valores de CcO (0,41 ha·h⁻¹) e RcE (0,17 ha·h⁻¹). Esses resultados evidenciam maior eficiência operacional e melhor aproveitamento do tempo disponível para o trabalho, reforçando sua superioridade em termos de produtividade.

Tabela 6. Valores médios de velocidade (VM), capacidade de campo efetiva (CcE), capacidade de campo operacional (CcO) e rendimento de campo efetivo (RcE).

Sistemas	VM (km h ⁻¹)	CcE (ha h ⁻¹)	CcO (ha h ⁻¹)	RcE (ha h ⁻¹)
MAN	1,06a	0,32a	0,21b	0,08b
PSM	0,87a	0,32a	0,36a	0,16a
MEC	0,94a	0,28a	0,41a	0,17a
CV (%)	35,03	35,03	25,75	44,47

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Essa diferença de eficiência impacta diretamente o indicador final de produtividade, a Capacidade de Campo Operacional (CcO). A superioridade do sistema MEC (0,41ha h⁻¹) sobre os demais, e possuindo o maior Rendimento de Campo Efetivo (RcE), confirma o princípio da mecanização estabelecido por Balastreire (1987) a produtividade real é uma função da eficiência do ciclo completo, e não apenas da velocidade de um elemento isolado.

Diante do exposto, a análise integrada dos parâmetros de desempenho evidencia que o sistema totalmente mecanizado (MEC) apresenta superioridade técnica inquestionável em termos de eficiência produtiva para o coveamento na implantação da cultura do cacau. Os indicadores quantitativos, como a Capacidade de campo Operacional (0,41 ha h⁻¹) e o Rendimento de campo Efetivo (0,17 ha h⁻¹), demonstram que o sistema MEC supera significativamente as alternativas semimecanizada (PSM) e manual (MAN) em produtividade.

Entretanto, essa superioridade deve ser interpretada de forma crítica e contextualizada. O tempo reduzido para execução das covas pelo sistema mecanizado, apesar de vantajoso em escala produtiva, pode, em algumas condições, comprometer a qualidade do preparo do solo, fator decisivo para o estabelecimento e desenvolvimento das plantas (REICHERT et al., 2007). Portanto, recomenda-se que avaliações futuras incorporem análises qualitativas detalhadas, incluindo aspectos agrônômicos que garantam que a velocidade não sacrifique a funcionalidade técnica das covas.

Além disso, a adoção do sistema mecanizado envolve desafios práticos relevantes que devem ser levados em consideração pelos gestores agrícolas e produtores. O custo inicial de investimento em maquinário, bem como os custos recorrentes de manutenção, combustível e capacitação de operadores (MIALHE, 1996), pode representar barreiras significativas, sobretudo para pequenos e médios agricultores, característicos da agricultura familiar (SABATO; LIMA, 2006). A viabilidade econômica e financeira do sistema MEC deve ser

avaliada frente ao potencial de incremento produtivo, visando garantir sustentabilidade financeira do empreendimento agrícola.

Outro ponto crítico refere-se à adaptabilidade do sistema mecanizado em propriedades com pequenas áreas, topografia acidentada ou irregularidades no terreno, condições que limitam o uso eficiente da mecanização (BALASTREIRE, 1987). Nestes casos, os sistemas semi mecanizados e manuais mantêm sua relevância por oferecerem maior flexibilidade operacional, ainda que com menor capacidade de campo.

5.2 Viabilidade Econômica

A apresentação e a análise dos custos em dólar norte-americano (US\$) justificam-se pela natureza do cacau enquanto commodity agrícola de ampla relevância no mercado internacional, cujos preços e parâmetros de comercialização são estabelecidos e referenciados nas principais bolsas de valores globais, especialmente na Intercontinental Exchange (ICE), em Nova York, e na Londres. Segundo Santos et al. (2023), a utilização de uma moeda estável em estudos de viabilidade econômica no agronegócio é estratégica para mitigar as distorções causadas pela volatilidade do câmbio nacional e permitir a comparabilidade dos dados com a literatura científica internacional.

Conforme defendido por MELO (2021), a utilização dessa moeda de referência possibilita maior comparabilidade econômica, padronização analítica e alinhamento com a dinâmica do mercado internacional do cacau, permitindo que os resultados obtidos sejam interpretados em consonância com os indicadores globais de formação de preços dessa *commodity*.

Os valores obtidos com os cálculos para custo horário (CH), incluindo custos fixos e variáveis dos diferentes sistemas de coveamento no transplântio de mudas de cacau, estão demonstrados na Tabela 7, convertidos com base na cotação de R\$ 5,4217.

Tabela 7. Custos horários (U\$ h⁻¹) dos diferentes sistemas de coveamento no transplântio de mudas de cacau.

Custos	Tratamentos		
	MAN	PSM	MEC
Juros	0,002	0,05	1,45
Depreciação	0,007	0,55	1,17
Alojamento	0,000	0,38	0,45
Seguro	0,002	1,55	1,81
Ajudante Geral	1,59	1,51	1,51
Tratorista	0	0	2,38
Gasolina	0	8,84	0
Diesel	0	0	7,48
Lubrificantes	0	0,12	0,08
Manutenção	0,015	0,03	0,14
Total	1,61	13,07	16,51

MAN: Manual; PSM: Semi mecanizado; MEC: Mecanizado; Cotação U\$ 1,00: R\$5,42

A análise dos custos horários operacionais (U\$ h⁻¹) para os diferentes sistemas de coveamento demonstra uma estratificação baseada na intensidade de capital e mão de obra empregada. O sistema Mecanizado (MEC) apresentou o custo horário mais elevado (U\$ 16,51), seguido pelo Perfurador Semi mecanizado (PSM) com U\$ 13,07 e, por fim, o sistema Manual (MAN) com U\$ 1,61. Esta disparidade reflete as distintas estruturas de custo intrínsecas a cada tecnologia, um fator central na gestão e no planejamento agrícola. O custo proeminente do sistema MEC é majoritariamente influenciado pelos seus componentes variáveis, com destaque para o consumo de Diesel (45,3%) e pela mão de obra especializada, representada pelo Tratorista (14,5%). Adicionalmente, os custos fixos (Juros, Depreciação, Alojamento e Seguro), que somam U\$ 3,78 por hora, correspondem a 22,9% do custo total. Este perfil de custo, com alta representatividade dos custos fixos, é um reflexo direto do elevado investimento inicial em capital que a mecanização demanda, conforme a metodologia consagrada para cálculo de custos de máquinas agrícolas (EMBRAPA, 2005).

No sistema PSM, observa-se uma acentuada dependência de um único insumo: a Gasolina, que sozinha responde por 67,6% do custo horário. Tal característica torna este sistema particularmente vulnerável às flutuações de preço dos combustíveis, representando um risco econômico considerável para o produtor. A dependência de combustíveis fósseis é um dos principais componentes do custo variável na agricultura motorizada e impacta diretamente a rentabilidade das operações (MICHELON et al., 2019). Por sua vez, o sistema MAN caracteriza-se como um modelo intensivo de mão de obra, onde o custo do Ajudante

Geral representa 98,4% do custo horário total. O baixo valor absoluto (U\$ 1,62) torna-o atrativo sob a ótica de um baixo desembolso de capital inicial. Contudo, a viabilidade deste sistema está intrinsecamente ligada à disponibilidade e ao custo da mão de obra regional, um fator de crescente preocupação na cacauicultura do Sul da Bahia, que historicamente enfrenta desafios relacionados à gestão e oferta de trabalhadores rurais (ARGÔLO et al., 2012).

A análise do custo horário, embora informativa sobre a estrutura de gastos de cada sistema, não determina por si só a sua viabilidade econômica. O fator determinante é a eficiência da operação em campo, que traduz o custo no tempo em um custo por unidade de área. Conforme a literatura, espera-se que sistemas mecanizados, apesar do maior custo horário, compensem este valor por meio de um rendimento operacional superior, resultando em um menor custo por hectare (SILVA et al., 2010). Para verificar se essa premissa se aplica ao presente estudo, a Tabela 8 confronta o custo horário (CH) de cada tratamento com seu respectivo Custo Operacional (CO) final, expresso em U\$ ha⁻¹.

Tabela 8. Custo Operacional (U\$ ha⁻¹) dos diferentes sistemas de coveamento para o transplântio de mudas.

Tratamentos	Custo horário (CH U\$ h ⁻¹)	Custo operacional (CO U\$ ha ⁻¹)
MAN	1,61	339,69
PSM	13,07	470,77
MEC	16,51	676,96

MAN: Manual; PSM: Semi mecanizado; MEC: Mecanizado; Cotação U\$ 1,00: R\$ 5,42

Os resultados demonstram que o maior custo operacional para o transplântio das mudas foi encontrado no sistema Mecanizado (MEC), com um valor de U\$ 676,96 ha⁻¹. Em contrapartida, o sistema Manual (MAN) apresentou-se como o de menor custo operacional (U\$ 339,69 ha⁻¹), seguido pelo sistema com Perfurador Semi mecanizado (PSM) (U\$ 470,77 ha⁻¹). A diferença monetária entre o sistema MAN e o sistema MEC atinge U\$ 337,27 por hectare. Extrapolando essa diferença para uma área de 20 hectares, um módulo comum na agricultura, o valor representaria um custo adicional de U\$ 6.745,40.

Este resultado indica que, nas condições avaliadas, a maior capacidade de campo do equipamento mecanizado não foi suficiente para diluir seus elevados custos horários (fixos e variáveis) a ponto de torná-lo mais competitivo que o sistema manual em termos de custo por área. Esse fenômeno evidencia um ponto crítico na mecanização: a necessidade de uma escala de uso que justifique o alto custo de aquisição e manutenção dos ativos (EMBRAPA, 2005).

Apesar de apresentar o menor custo operacional, a sustentabilidade do sistema MAN a longo prazo é questionável. Sua viabilidade está diretamente atrelada à disponibilidade e ao custo da mão de obra, um fator historicamente crítico e de crescente preocupação na cacauicultura do Sul da Bahia (ARGÔLO et al., 2012).

Por outro lado, o sistema MEC oferece vantagens operacionais não-monetárias significativas, como maior velocidade e padronização, aspectos valorizados na gestão agrícola moderna (SILVA et al., 2010). A adoção de tecnologias mecanizadas é influenciada pela expectativa de retorno e redução da complexidade operacional em longo prazo (PELLINI et al., 2022).

Desta forma, o elevado custo operacional do sistema mecanizado pode funcionar como uma barreira significativa para sua adoção em propriedades de menor escala, tornando o sistema manual, apesar de suas limitações, a opção economicamente mais racional para esse perfil de produtor. A seleção de uma tecnologia agrícola, portanto, transcende a simples comparação de custos, exigindo uma análise de investimento prospectiva que avalie a geração de valor e a exposição ao risco ao longo do ciclo de vida do projeto.

A escolha de um sistema operacional agrícola transcende a simples comparação de custos, exigindo uma análise de investimento prospectiva que avalie a geração de valor e a exposição ao risco ao longo do ciclo de vida do projeto, especialmente quando analisada sob uma perspectiva de moeda forte para fins de exportação. A análise a seguir, para um empreendimento de 20 hectares de cacau em um horizonte de 10 anos, aprofunda-se nessa complexidade, utilizando a cotação cambial de $\text{US\$ } 1,00 = \text{R\$ } 5,42$ (referente a 24/02/2026).

O ponto de partida da análise de viabilidade é o estabelecimento de um cenário base, cujos custos anuais de implantação, convertidos para dólar, estão detalhados na Tabela 9. Estes valores representam o desembolso no primeiro ano do projeto e são a fundação para o cálculo do fluxo de caixa internacionalizado.

Tabela 9 - Estimativa de Custo Total no Ano de Implantação (Projeto de 20 ha)

Custos (U\$ ano ⁻¹)	Tratamentos		
	MAN	PSM	MEC
Custo de Implantação	U\$ 6.793,81	U\$ 9.415,50	U\$ 70.872,48
Insumos e Tratos Culturais	U\$ 55.333,18	U\$ 55.333,18	U\$ 55.333,18
Custo Total Anual	U\$ 62.126,99	U\$ 64.748,68	U\$ 126.205,66

MAN: Manual; PSM: Semi mecanizado; MEC: Mecanizado; Cotação U\$ 1,00: R\$ 5,42

A análise da Tabela 4 revela que o sistema Mecanizado (MEC) exige um desembolso total no primeiro ano de U\$ 126.205,66, valor este que supera em 103% o custo do sistema Manual (MAN). O ponto crítico reside no custo real de implantação do MEC, fixado em U\$ 70.872,48, o que evidencia a elevada barreira de entrada financeira para a mecanização integral do coveamento em 20 hectares. Esta disparidade é justificada por SILVA et al. (2010), que ressalta que sistemas mecanizados demandam um aporte de capital inicial substancial devido aos custos operacionais fixos e variáveis de grande escala, elevando o "custo de entrada" tecnológico. Por outro lado, o custo de manutenção (insumos e tratos culturais) permanece uniforme em U\$ 55.333,18, evidenciando que a variação de viabilidade entre os sistemas depende exclusivamente da eficiência da implantação. A projeção desses custos em um horizonte de 10 anos, considerando uma receita moderada de U\$ 55,33 por arroba, permite a extração dos indicadores financeiros apresentados na Tabela 10.

A análise da Tabela 10 permite uma compreensão da viabilidade econômica a longo prazo, transcendendo a mera observação dos custos imediatos e focando na capacidade de cada sistema em gerar riqueza sob as condições do mercado internacional. O Valor Presente Líquido (VPL) consolidado na Tabela 10 atua como o principal balizador da riqueza líquida incremental gerada pelo projeto em um horizonte de 10 anos, já descontado o custo de oportunidade do capital

Tabela 10 - Análise de Investimento no Cenário Moderado em Dólar (Ciclo de 10 Anos)

Indicadores	Tratamentos		
	MAN	PSM	MEC
Investimento Inicial (U\$)	U\$ 184,44	U\$ 1.198,89	U\$ 57.823,19
VPL (U\$)	U\$ 338.491,67	U\$ 335.136,42	U\$ 223.636,54
TIR (%)	68,0%	65,6%	26,4%
Payback (anos)	3,30	3,35	5,12

MAN: Manual; PSM: Semi mecanizado; MEC: Mecanizado; VPL: Valor Presente Líquido; TIR: Taxa Interna de retorno; Cotação U\$ 1,00: R\$ 5,42

Observa-se que o sistema Manual (MAN) se destaca com um VPL de U\$ 338.491,67. No entanto, um dado importante para o planejamento estratégico reside na Taxa Interna de Retorno (TIR) do sistema Mecanizado (MEC), que se fixou em 26,4%. Embora este percentual seja inferior aos 68,0% do sistema manual, ele ainda representa uma rentabilidade mais de duas vezes superior à Taxa Mínima de Atratividade (TMA) de 12% adotada. Segundo SILVA (2013), projetos que apresentam TIR acima de 15% em mercados de *commodities* são considerados altamente resilientes. Portanto, mesmo com o elevado custo de implantação de U\$ 70.872,48, o sistema MEC permanece financeiramente atrativo e executável, justificando o aporte tecnológico sob a ótica da rentabilidade sobre o capital investido.

O Payback Descontado de 5,12 anos para o sistema MEC, quando comparado aos 3,30 anos do sistema MAN, revela uma importante característica do investimento em tecnologia: o maior tempo de exposição do capital. Conforme salientado por Casarotto Filho & Kopittke (1998), um prazo de retorno mais longo aumenta a sensibilidade do projeto a variáveis externas. No caso do cacau, este período de 5 anos coincide com a transição da lavoura para a fase de produção plena. Contudo, a análise desse dado não deve ser feita de forma isolada; a disparidade de quase dois anos na recuperação do investimento deve ser pesada contra o ganho em previsibilidade operacional. Gitman (2010) reforça que projetos de maior capital intensivo, apesar do payback mais lento, tendem a oferecer fluxos de caixa mais estáveis ao reduzir a variabilidade dos custos operacionais futuros.

Em termos práticos, o produtor que opta pelo sistema mecanizado está sacrificando uma parcela do lucro presente para assegurar que a implantação de seus 20 hectares ocorra sem os gargalos de produtividade inerentes ao trabalho manual. Pellini et al. (2022) destacam que a adoção de tecnologias mecanizadas em áreas de média escala é frequentemente uma resposta à escassez de mão de obra; nesse contexto, a perda nominal no VPL funciona como um prêmio de seguro contra a inoperância.

Conforme a metodologia de Richetti (2013), o ponto de nivelamento indica a quantidade de produto necessária para cobrir todos os custos de produção, sendo este inversamente proporcional às variações do preço. Assim, em períodos de preços reduzidos em moeda estrangeira (U\$), maior será a produtividade exigida por hectare para que o sistema mecanizado, que detém o maior custo total, não comprometa a renda familiar e a taxa de retorno. Esta análise é fundamental para gerenciar a propriedade de forma clara e objetiva, garantindo a viabilidade econômica do cacau diante das flutuações do mercado internacional.

Para avaliar como a rentabilidade de cada sistema reage a flutuações de mercado, foram realizadas análises de sensibilidade em duas variáveis críticas: o preço de venda da arroba de cacau e o custo da mão de obra, sendo esta uma ferramenta essencial para a gestão de risco em projetos agropecuários (RICHETTI, 2013).

Tabela 11 - Análise de Sensibilidade do VPL (U\$) à Variação no Preço da Arroba

Preço da arroba (R\$)	VPL Sistema MAN	VPL Sistema MEC	Diferença (MAN - MEC)
27,67 (Baixo)	U\$ 9.798,22	- U\$ 53.863,60	U\$ 63.661,82
55,33 (Base)	U\$ 338.491,67	U\$ 274.830,19	U\$ 63.661,48
82,99 (Alto)	U\$ 667.185,12	U\$ 603.523,98	U\$ 63.661,14

MAN: Manual; PSM; MEC: Mecanizado; VPL: Valor Presente Líquido; Cotação U\$ 1,00: R\$ 5,42

A Tabela 11 revela um VPL negativo de - U\$ 53.863,60 para o sistema Mecanizado (MEC) no cenário baixo. Este resultado indica que, a um preço de U\$ 27,67 por arroba, a operação mecanizada não apenas deixa de gerar lucro, como falha em recuperar o capital investido e cobrir o custo de oportunidade ao longo de 10 anos. Conforme salientado por RICHETTI (2013), a mecanização eleva o ponto de equilíbrio do projeto, tornando-o mais dependente de margens de lucro elevadas para justificar o custo fixo do maquinário. Em contrapartida, o sistema Manual (MAN) demonstra uma resiliência notável, mantendo um

VPL positivo de U\$ 9.798,22 mesmo sob preços deprimidos, o que se deve à sua estrutura de custos predominantemente variáveis e ao baixo aporte inicial de capital.

Um ponto técnico de destaque é a constância da diferença entre o VPL do sistema MAN e do MEC (aproximadamente U\$ 63.661), independentemente do preço da arroba. Isso ocorre porque o diferencial de custo entre os dois sistemas está concentrado no investimento inicial e nas despesas operacionais fixas de implantação, e não na receita. Assim, o sistema mecanizado entra na "corrida" financeira com uma desvantagem nominal que só é diluída em escalas de produção muito maiores ou em cenários de preços extraordinários. Como aponta MELO (2021), a transmissão de preços internacionais no mercado de cacau é implacável; portanto, o produtor que opta pelo sistema MEC está assumindo um risco de mercado significativamente maior em troca de estabilidade operacional.

Em seguida, a análise na Tabela 12, isola o principal risco do sistema, MAN: a sua total exposição à volatilidade do custo da mão de obra, um desafio crônico na cacauicultura baiana (Argôlo et al., 2012; CEPLAC, 2010).

Tabela 12 - Análise de Sensibilidade do VPL (R\$) ao Custo da Mão de Obra

Variação no Custo da Mão de Obra	Custo de Implantação (MAN)	VPL (MAN)	VPL (MEC) - Fixo
+0% (Base)	U\$ 6.793,81	U\$ 338.491,67	U\$ 274.830,19
+25%	U\$ 8.492,26	U\$ 337.166,15	U\$ 274.830,19
+50%	U\$ 10.190,71	U\$ 335.840,63	U\$ 274.830,19

MAN: Manual; MEC: Mecanizado; VPL: Valor Presente Líquido; Cotação U\$ 1,00: R\$ 5,42

Esta análise quantifica a vulnerabilidade do sistema manual. Um aumento de 50% nos custos trabalhistas, um cenário plausível ao longo de uma década, corrói o VPL em aproximadamente U\$ 2.651,04. Embora não inviabilize o projeto, demonstra uma erosão contínua de sua vantagem financeira, um risco que o sistema MEC mitiga ao substituir custo variável (mão de obra) por custo fixo (depreciação do maquinário). A decisão de investimento, contudo, não pode se basear unicamente em projeções de fluxo de caixa; ela deve incorporar fatores estratégicos e operacionais que afetam a sustentabilidade do negócio (Reis, 2007). A Tabela 13 sintetiza essa análise holística.

Tabela 13 - Matriz de Análise Qualitativa e Estratégica dos Sistemas de coveamento

Critério de Análise	Tratamentos		
	MAN	PSM	MEC
Vantagem Financeira (VPL Base)	Alta	Alta	Média
Risco (Dependência de Mão de Obra)	Alto	Alto	Baixo
Risco (Volatilidade de Insumos)	Baixo	Alto (Gasolina)	Médio (Diesel)
Escalabilidade (Capacidade de Expansão)	Baixa	Baixa	Alta
Previsibilidade e Controle Operacional	Baixa	Média	Alta
Ergonomia e Segurança do Trabalho	Baixa	Média	Alta

MAN: Manual; PSM: Semi-mecanizado; MEC: Mecanizado

A análise encadeada das tabelas revela uma clássica dicotomia do agronegócio: a escolha entre um sistema de baixo custo e alto risco operacional (Manual) e um sistema de capital intensivo com maior controle e previsibilidade (Mecanizado). A teoria financeira, representada pelo VPL, favorece o sistema Manual (Casarotto Filho & Kopittke, 1998). No entanto, a teoria da administração da produção agrícola alerta para os riscos não quantificados no fluxo de caixa, como a garantia de execução das operações na janela de plantio ideal, que a mecanização assegura (Batalha, 2007).

O investimento no sistema Mecanizado, portanto, vai além da busca pela máxima rentabilidade. Ele se configura como uma decisão estratégica de mitigação de risco. O VPL inferior em R\$ 560 mil pode ser racionalizado como uma apólice de seguro contra a volatilidade do mercado de trabalho e como um investimento na capacidade futura de expansão da área produtiva (escalabilidade). Conforme afirma Gitman (2010), a preferência por projetos de menor VPL pode ser justificada se estes reduzirem significativamente o risco global do negócio.

Ao observar a aplicabilidade prática dos sistemas sob a ótica dos sistemas de plantio mais adotados a região sul da Bahia, o sistema Semi-mecanizado (PSM) apresenta-se como a alternativa de maior eficiência adaptativa para a agricultura familiar e médios produtores. Diferente do sistema Mecanizado (MEC), que possui restrições de trafegabilidade em áreas de Cabruca ou topografias acidentadas, o PSM mantém a versatilidade do manejo manual com um incremento significativo na performance operacional, permitindo a transição tecnológica em sistemas de Pleno Sol e Cabruca, sem exigir o alto aporte de capital

imobilizado de um trator agrícola, adequando-se à capacidade de investimento do pequeno produtor. Portanto, enquanto o sistema Manual (MAN) é limitado pela fadiga humana e o Mecanizado pela topografia, o Semi-mecanizado consolida-se como a solução técnica ideal para a diversidade de cenários produtivos da cacauicultura.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise comparativa dos sistemas de coveamento para a cacauicultura permitiu concluir que a escolha tecnológica não é baseada apenas pelos custos diretos, mas por um equilíbrio estratégico entre desempenho, viabilidade econômica e mitigação de riscos operacionais. Os resultados demonstraram não haver diferença estatística significativa no desempenho operacional entre os sistemas, o que desloca o critério de decisão para a análise econômica e gerencial, considerando que cada propriedade apresenta particularidades quanto à topografia, tipos de máquinas e nível tecnológico.

O sistema manual (MAN), apesar de apresentar os melhores indicadores financeiros nominais, com custo de U\$ 0,30 por cova e o maior Valor Presente Líquido (VPL) de U\$ 338.491,67, carrega desvantagens estratégicas críticas. Sua viabilidade é inteiramente dependente da disponibilidade de mão de obra, expondo a operação a uma alta volatilidade de custos e riscos gerenciais. Em contrapartida, o sistema mecanizado (MEC) demonstrou limitações para a escala avaliada, apresentando o maior custo por cova (U\$ 0,61) e o menor VPL (U\$ 223.636,54). Seu alto custo de capital, com investimento de implantação de U\$ 70.872,48, resultou em indicadores de lucratividade menores, fenômeno comum em sistemas de alta tecnologia onde o elevado custo fixo pressiona a rentabilidade final. Além disso, a tecnologia mecanizada possui restrições geográficas, sendo tecnicamente inviável em sistemas agroflorestais como a Cabruca.

Neste contexto, o sistema semi-mecanizado (PSM) emerge como a solução de melhor equilíbrio técnico-econômico e a alternativa mais estratégica para a agricultura familiar e médios produtores. Embora seu custo por cova (U\$ 0,42) e VPL (U\$ 335.136,42) sejam numericamente próximos ao sistema manual, ele oferece uma vantagem decisiva na redução da dependência de mão de obra e na melhoria da ergonomia. O PSM destaca-se pela sua versatilidade, sendo o único sistema motorizado capaz de operar com eficiência tanto em áreas de Pleno Sol quanto no sistema Cabruca, onde a densidade arbórea impede o tráfego de tratores. Com uma Taxa Interna de Retorno (TIR) de 65,6% e Payback de 3,35 anos, o sistema é economicamente viável e eficiente, garantindo renda líquida positiva e sustentabilidade ao empreendimento rural. Portanto conclui-se que o sistema semi-mecanizado é a ferramenta de transição tecnológica ideal para a cacauicultura, pois concilia a viabilidade econômica necessária para a agricultura familiar e o médio produtor com a flexibilidade operacional exigida pela diversidade dos sistemas de cultivo do cacau.

8. REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16315. (2015). Máquinas agrícolas – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ANDRADE, E. M.; PIMENTA, F. M.; MUNHÃO, D. D.; MORAIS, F. Gestão de custos na produção de milho e soja: um estudo de caso. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, n. 7, p. 780-787, 2012.
- BAIO, F. H. R.; RODRIGUES, A. D.; SANTOS, G. S. Eficiência energética de tratores agrícolas em diferentes sistemas de preparo do solo. *Engenharia Agrícola*, v. 31, n. 4, p. 673-681, 2011.
- BARNES, R. Estudos de movimentos e de tempos: Projeto e medida do trabalho. São Paulo: Edgar Blucher, 1977.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. Secretaria de Inovação, Desenvolvimento Rural e Irrigação. **Cacau do Brasil**. Brasília, DF: MAPA, 2022.
- CASAROTTO FILHO, N.; KOPITTE, B. H. *Análise de Investimentos*. São Paulo: Atlas, 1998
- CHIAVENATO, I. *Introdução à teoria geral da administração*. 7 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2003.
- DE CARLO, L. T. (1997). On the meaning and use of kurtosis. *Psychological Methods*, 2(3), 292-307. Disponível em: <https://doi.org/10.1037/1082-989X.2.3.292>.
- EMBRAPA. (2016). *Recomendações técnicas para o cultivo do cacau*. Belém: Embrapa Amazônia Oriental. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/>.
- FENNER P. T. *Métodos de cronometragem e a obtenção de rendimentos para atividades de colheita de madeira*. Botucatu: Editora UNESP, 2002.
- FERNANDES, C. A.; CARVALHO, L. M. (2019). Análise estatística em experimentos agrícolas: aplicações práticas. *Revista Brasileira de Biometria*, 37(2), 123-140. Disponível em: <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i2.393>.

FERNANDES, H. C.; MODOLO, A. J.; OLIVEIRA, E. Adaptação de uma plantadora de batata para trabalhar em sistemas de plantio direto e cultivo mínimo. *Engenharia Agrícola*, v. 24, n. 3, p. 630-638, 2004.

GARCIA, F. A.; SILVA, R. P.; PEREIRA, J. O. Gestão de custos em pequenas propriedades rurais: uma abordagem prática. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 51, n. 3, p. 567-582, 2013.

GOMEZ, K. A.; GOMEZ, A. A. (1984). *Statistical procedures for agricultural research*. 2. ed. New York: Wiley. ISBN 978-0-471-87092-0.

JOANES, D. N.; GILL, C. A. (1998). Comparing measures of sample skewness and kurtosis. *The Statistician*, 47(1), 183-189. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2988437>. DOI: 10.1111/1467-9884.00122.

LOPES, A. S.; GUIMARÃES GUILHERME, L. R.; RAMOS, S. J. (2019). *Manejo do solo para culturas tropicais*. Viçosa: UFV.

LOPES, A.; LANÇAS, K. P.; GUERRA, S. P. S. Ergonomia em operações manuais na agricultura: impacto na produtividade. *Engenharia Agrícola*, v. 27, n. 2, p. 412-420, 2007.

MALINOVSKI, J. R. Metodologia do custo-hora para máquinas florestais. In: *Curso de atualização sobre sistemas de exploração e transporte florestal*, 4., 1983, Curitiba. Anais. Curitiba: Editora UFPR, 1983.

MELLO, FILHO, O. A.; SANT'ANNA, C. M. Estudos de tempos e movimentos na desbrota do eucalipto com motorroçadora. In: *Simpósio Brasileiro sobre segurança no trabalho florestal e agrícola*, 2000. Anais.. Belo Horizonte: Ergoflor, 2000. p 182-186.

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

MIALHE, L. G. *Máquinas agrícolas: fundamentos para seleção, operação e manutenção*. São Paulo: EPU, 1996.

MOLIN, J. P.; MILAN, M.; POVEDA, C. A. Agricultura de precisão: impactos econômicos na aplicação de insumos. *Engenharia Agrícola*, v. 34, n. 6, p. 1178-1188, 2014.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. (2019). Applied statistics and probability for engineers. 7. ed. New York: Wiley. ISBN 978-1-119-40036-3.

PACHECO, E. P. Seleção e custo operacional de máquinas agrícolas. Piracicaba: FEALQ, 2000.

PELOIA, P. R.; MILAN, M. Proposta de um sistema de medição de desempenho aplicado à mecanização agrícola. Engenharia Agrícola, v. 30, n. 4, p. 681-691, 2010.

PIMENTEL, F. (2009). Curso de estatística experimental. 15. ed. Piracicaba: FEALQ. ISBN 978-85-7133-038-2.

RAIJ, B. van. (2011). Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas.

ROCHA FILHO, H. Análise de fatores que afetam o desempenho e custo de extração de madeira de eucalipto com caminhão autocarregável. 1983. 108p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 1993.

SANTOS, A. J.; MAEDA, S. Manutenção de máquinas agrícolas: impacto nos custos operacionais. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 12, n. 5, p. 543-550, 2008.

SANTOS, F. L.; QUEIROZ, D. M.; VALENTE, D. S. M. Gestão de recursos humanos em operações agrícolas manuais. Engenharia Agrícola, v. 35, n. 3, p. 456-465, 2015.

SANTOS, J. C.; SILVA, E. F.; SOUZA, J. O. (2020). Tecnologias para o cultivo do cacau no Brasil. Revista Brasileira de Agricultura Tropical, 12(3), 45-60.

SEIXAS, F. ; BARBOSA, R. F.; RUMMER, R. Tecnologia que protege a saúde do operador. Revista da madeira, Curitiba, v.14, n.82, p.68-73, jul. 2004.

SILVA, J. M.; OLIVEIRA, E. (2020). Avanços na cacauicultura brasileira. Ciência Rural, 50(5), e20190876. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190876>.

SIMIONI, F. J.; SILVA, R. P.; LOPES, A. Softwares de gestão em operações mecanizadas: eficiência e custos. Engenharia Agrícola, v. 36, n. 4, p. 712-722, 2016.

SOUZA, C. A. S.; DIAS, L. A. S. (2017). Cacao: cultivo, manejo e sustentabilidade. *Informações Agronômicas*, 158, 12-25. Disponível em: [http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/8F7A9C3B5D1E4B6E8525814C006D7F7A/\\$FILE/IA158.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/8F7A9C3B5D1E4B6E8525814C006D7F7A/$FILE/IA158.pdf).

STEEL, R. G. D.; TORRIE, J. H.; DICKY, D. A. (1997). *Principles and procedures of statistics: a biometrical approach*. 3. ed. New York: McGraw-Hill. ISBN 978-0-07-061028-6.

TRIOLA, M. F. (2018). *Elementary statistics*. 13. ed. Boston: Pearson. ISBN 978-0-13-446245-5.

WALPOLE, R. E.; MYERS, R. H.; MYERS, S. L.; YE, K. (2016). *Probability & statistics for engineers & scientists*. 9. ed. Boston: Pearson. ISBN 978-0-13-411585-6.