

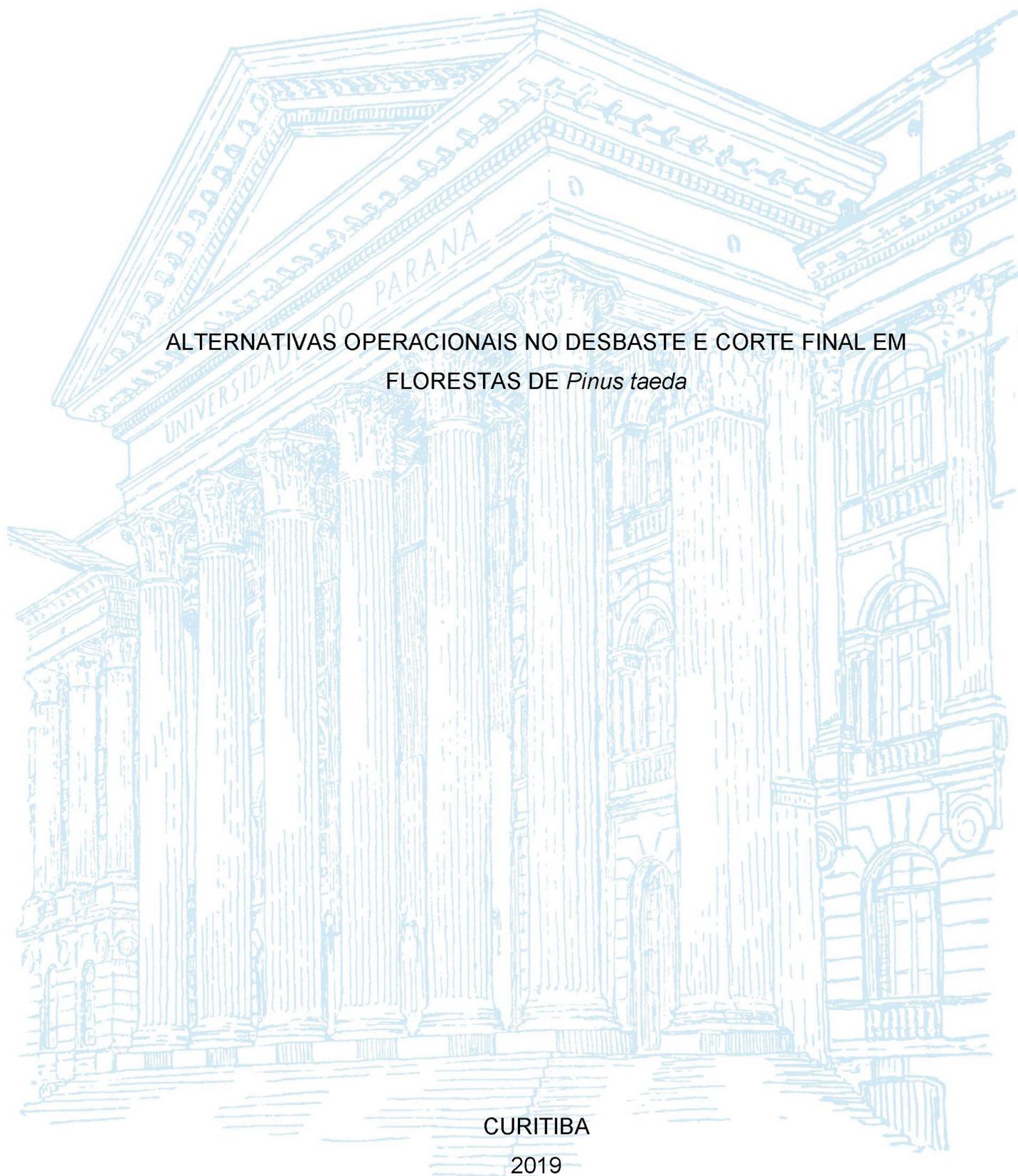
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARCELO BONAZZA

ALTERNATIVAS OPERACIONAIS NO DESBASTE E CORTE FINAL EM
FLORESTAS DE *Pinus taeda*

CURITIBA

2019



MARCELO BONAZZA

ALTERNATIVAS OPERACIONAIS NO DESBASTE E CORTE FINAL EM
FLORESTAS DE *Pinus taeda*

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Julio Eduardo Arce

Coorientadores: Prof. Dr. Jean Alberto Sampietro

Prof. Dr. Jaime Wojciechowski

CURITIBA

2019

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Bonazza, Marcelo

Alternativas operacionais no desbaste e corte final em florestas de
Pinus taeda / Marcelo Bonazza. – Curitiba, 2019.
147 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Julio Eduardo Arce

Coorientadores: Prof. Dr. Jean Alberto Sampietro

Prof. Dr. Jaime Wojciechowski

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências
Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa:
Curitiba, 27/02/2019.

Área de concentração: Manejo Florestal.

1. Exploração florestal – Custos. 2. Produtividade florestal. 3. Colheita
florestal. 4. Desbastes florestais. 5. Mecanização florestal. 6. *Pinus taeda*.
7. Teses. I. Arce, Julio Eduardo. II. Sampietro, Jean Alberto. III.
Wojciechowski, Jaime. IV. Universidade Federal do Paraná, Setor de
Ciências Agrárias. V. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.31



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
FLORESTAL - 40001016015P0

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **MARCELO BONAZZA** intitulada: **ALTERNATIVAS OPERACIONAIS NO DESBASTE E CORTE FINAL EM FLORESTAS DE *Pinus taeda***, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 27 de Fevereiro de 2019.

JULIO EDUARDO ARCE
Presidente da Banca Examinadora

RENATO CESAR GONCALVES ROBERT
Avaliador Interno (UFPR)

JÉAN ALBERTO SAMPIETRO
Avaliador Externo (UDESC)

NILTON CESAR FIEDLER
Avaliador Externo (UFES)

EDUARDO DA SILVA LOPES
Avaliador Externo (UNICENTRO)



À minha filha Gabriela e minha esposa Alessandra por estarem ao meu lado durante essa importante jornada.

Aos meus avós Orlando Bonazza (*in memoriam*) e Irite Maria Bonazza pela criação, educação e amor proporcionados.

Aos meus pais Janete Bonazza e Roque Nezello pelo afeto, confiança e incentivo.

DEDICO.

BIOGRAFIA DO AUTOR

Marcelo Bonazza, filho de Janete Bonazza e Roque Nezello, nasceu em Joaçaba, Santa Catarina, em 26 de maio de 1990. No ano de 2005 tornou-se interno no curso de Técnico em Agropecuária no Colégio Sociedade Porvir Científico La Salle, onde se formou em 2008. Nesse mesmo ano, iniciou seus estudos de graduação na Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), na qual graduou-se Engenheiro Florestal em 2012. No ano de 2013, trabalhou no Inventário Florestal Nacional (IFN) do estado do Paraná. Entre 2013 e 2014, realizou seus estudos de Pós-Graduação ao nível de Mestrado no curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da UDESC. Em 2015 começou seus estudos de Doutorado no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná na área de concentração Manejo Florestal, os quais são concluídos com a defesa desta tese. Desde abril de 2016, faz parte do corpo docente do curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Santa Catarina.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me concedido discernimento e persistência para concluir mais uma etapa desta jornada acadêmica.

À minha esposa Alessandra e minha filha Gabriela, pelo amor proporcionado, por alegrarem meus dias e me incentivarem a continuar. Sem dúvidas, o apoio de vocês foi fundamental para que eu chegasse até aqui.

Aos meus avós Orlando Bonazza (*in memoriam*) e Irite Maria Bonazza, que sempre terão meu agradecimento mais puro e especial, pois me ensinaram os valores e princípios a serem seguidos pelas pessoas do bem. Vocês são pessoas fundamentais em minha vida e só o agradecimento é pouco para expressar todo o amor que sinto por vocês.

Aos meus pais Janete Bonazza e Roque Nezello e aos demais de minha família, pelo amor, confiança e incentivo repassados a mim. Com certeza essa conquista também é de vocês.

Ao meu orientador Prof. Dr. Julio Eduardo Arce, pela orientação, confiança e principalmente pela amizade.

Aos professores Dr. Jean Alberto Sampietro e Dr. Jaime Wojciechowski pela co-orientação. Agradeço especialmente ao Prof. Jean pelas produtivas e incansáveis conversas florestais, pela grande amizade e incentivo proporcionados durante a realização deste trabalho.

Ao amigo e colega de trabalho Dr. Mario Dobner Júnior, pelas conversas e contribuições relacionadas às pesquisas desenvolvidas.

Ao Vinicius Costa Cysneiros pela grande amizade e pelas parcerias nos trabalhos desenvolvidos durante esse período, e a Ana Luiza de Rosa Castro pela amizade e convívio durante minha estadia em Curitiba.

Ao Prof. Dr. Allan Libanio Pelissari pela amizade e por todas as conversas produtivas durante a desenvolvimento da tese.

À Universidade Federal do Paraná, e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, pela oportunidade de realização do doutorado. O período vivenciado nessa instituição com certeza teve grande contribuição para meu crescimento profissional.

À Universidade Federal de Santa Catarina, por me conceder o período de licença para a conclusão da tese de doutorado.

À Empresa Florestal Gateados LTDA, pela disponibilidade e por viabilizar a realização dos estudos.

Às pessoas que auxiliaram nas coletas de dados a campo (Ari, Fagner, Flávia, Gabriel, Gabriela, Gregory, Helena, Lucas Muhlbauer, Lucas Parisotto, Luigi, Mateus Simas, Matheus Salamon, Miers, Natali, Raul, Rhayana, Roberta e Romano). Sem a ajuda de vocês esse trabalho não seria possível.

Aos colegas do Laboratório de Manejo Florestal da Universidade Federal do Paraná.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

Enfim, a todos que contribuíram de alguma forma para a concretização desse sonho.

Meus sinceros agradecimentos!

RESUMO

Tendo em vista a rentabilidade potencial dos povoamentos de *Pinus taeda* manejados para o uso múltiplo da madeira a longo prazo, torna-se imprescindível comparar alternativas operacionais para a execução das prescrições impostas pelos regimes de manejo. Este trabalho foi dividido em três capítulos, nos quais alternativas operacionais para a realização do desbaste pré-comercial e corte final desses povoamentos foram analisadas. No Capítulo 1, objetivou-se avaliar o desempenho, custos e percentual de engaiolamento das árvores de quatro prescrições de desbaste pré-comercial semimecanizado para plantações com 5 anos de idade. As prescrições estudadas foram: desbaste seletivo 'por baixo' com remoção de 250 árv. ha⁻¹ (PC_b) e desbaste seletivo 'pelo alto' com remoção de 250, 375 e 500 árv. ha⁻¹ (PC₂₅₀, PC₃₇₅ e PC₅₀₀, respectivamente). Registrou-se os tempos consumidos e o diâmetro à altura do peito (dap) das árvores derrubadas na operação. A produtividade, custos de produção e percentual de engaiolamento foram dependentes do dap e do tipo e prescrição de desbaste empregado. De forma geral, a execução da operação não apresenta problemas consideráveis relacionados ao engaiolamento e proporciona custos de produção médios variando de 158,01 R\$ ha⁻¹ (PC₂₅₀) até 260,72 R\$ ha⁻¹ (PC₅₀₀). No Capítulo 2, o objetivo foi comparar aspectos técnicos e custos de produção de dois sistemas mecanizados de colheita, árvores inteiras e toras curtas, em corte final do povoamento. O desempenho das máquinas de cada sistema foi determinado através de estudos de tempos e movimentos por meio de abordagem de modelagem, calculando-se, também, os custos operacionais e de produção. Os sistemas foram comparados no cenário atual de densidade de estradas e num cenário de densidade ótima de estradas. O sistema de árvores inteiras apresentou produtividades superiores e custos de produção inferiores ao de toras curtas. Contudo, o segundo respectivo sistema necessitou de menor densidade de estradas. A possível adequação para a densidade ótima de estradas reduziria em 40,5% e 31,3% os custos totais de produção (colheita + estradas) dos sistemas de árvores inteiras e toras curtas, respectivamente. Ambos os sistemas podem ser recomendados para essas operações, o de árvores inteiras por ser mais barato e o de toras curtas por ser mais versátil para situações de menor densidade de estradas. No Capítulo 3, o desempenho e custos do sistema mecanizado de toras curtas em operações de corte final foram avaliados. Além da determinação dos tempos consumidos e custos operacionais, também, verificou-se os efeitos do volume médio por tora, distância de extração e método de trabalho na extração, por meio de abordagem experimental e de modelagem. Os métodos de trabalho avaliados foram: extração de, 1 sortimento por ciclo operacional (T1); 2 sortimentos por ciclo (T2); e, 3 ou mais sortimentos por ciclo (T3). Nas condições médias de estudo, o sistema apresentou menor custo de produção quando T2 foi usado, devido sua maior produtividade. Entretanto, o T3 pode se tornar mais barato considerando-se alterações no volume médio por tora e distância de extração. Essa pesquisa fornece subsídios para melhoria da produtividade e redução dos custos desse sistema de colheita, possibilitando o aumento da rentabilidade no cultivo de povoamentos de pinus manejados para uso múltiplo da madeira.

Palavras-chave: Técnicas e operações florestais. Estudo do trabalho. Manejo florestal. Sistemas de colheita. Métodos de trabalho.

ABSTRACT

Given the potential profitability of *Pinus taeda* stands managed for the multiple use of wood in the long term, it is essential compare operational alternatives for the prescriptions implementation imposed by the management regimes. This work was divided into three chapters, in which operational alternatives for pre-commercial thinning and final cutting of these stands were analyzed. In Chapter 1, the objective was to evaluate the performance, costs and hanged tree percentage of four semi-mechanized pre-commercial thinning prescriptions for five-year-old plantations. The prescriptions studied were: selective thinning 'from below' with removal of 250 trees ha⁻¹ (PC_b) and selective thinning 'from above' with removal of 250, 375 and 500 trees ha⁻¹ (PC₂₅₀, PC₃₇₅ and PC₅₀₀, respectively). The time consumed and the diameter at the breast height (dbh) of the trees felled in the operation were registered. The productivity, production costs and hanged tree percentage were dependent of dbh and the thinning type and prescription employed. In general, the operation execution does not present considerable problems related to the hanged tree percentage and provides average production costs varying from 158.01 R\$ ha⁻¹ (PC₂₅₀) to 260.72 R\$ ha⁻¹ (PC₅₀₀). In Chapter 2, the objective was to compare technical aspects and production costs of two mechanized harvesting systems, full-tree and cut-to-length, in stands final cutting. The machines performance in each system was determined through time and motion studies using modeling approach, also, operational and production costs were calculated. The systems were compared in the of current road density scenario and in an optimal road density scenario. The full-tree system presented higher productivities and lower production costs than cut-to-length. However, the second system required less road density. The possible adequacy for optimum road density would reduce the total production costs (harvesting + roads) of full-tree and cut-to-length systems, respectively, by 40.5% and 31.3%. Both systems can be recommended for these operations, the full-tree for being cheaper and cut-to-length for being more versatile for situations of lower road density. In Chapter 3, the performance and costs of cut-to-length mechanized system in final cutting operations were evaluated. In addition to determining the time consumed and operating costs, we also verified the effects of the average log volume, extraction distance and extraction working method, through an experimental and modeling approach. The work methods evaluated were: extraction of, 1 assortment per operational cycle (T1); 2 assortments per cycle (T2); and, 3 or more assortments per cycle (T3). In average study conditions, the system showed a lower production cost when T2 was used due to its higher productivity. However, T3 may become cheaper considering changes in average log volume and extraction distance. This research provides subsidies to improve productivity and reduction costs of this harvesting system, making it possible to increase profitability in the pinus stands cultivation managed for wood multiple use.

Keywords: Forestry techniques and operations. Work study. Forest management. Harvesting systems. Work methods.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – DISTRIBUIÇÃO NATURAL DO <i>Pinus taeda</i> L. NOS ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA.....	26
FIGURA 2 – FLUXOGRAMA COM A SEQUÊNCIA DE ETAPAS A SEREM SEGUIDAS PARA A EXECUÇÃO DE UM ESTUDO DE MEDIÇÃO DO TRABALHO EM OPERAÇÕES FLORESTAIS.....	40
FIGURA 3 – CLASSIFICAÇÃO DO TEMPO NOS ESTUDOS DE MEDIÇÃO DO TRABALHO FLORESTAL.....	46
FIGURA 4 – DESENHO ESQUEMÁTICO DOS TRATAMENTOS ESTUDADOS. A: PC _b . B: PC ₂₅₀ . C: PC ₃₇₅ . D: PC ₅₀₀	54
FIGURA 5 - VARIAÇÃO DA P _{PMH} (árv. PMH ₀ ⁻¹) (A) E (ha PMH ₀ ⁻¹) (B) DA OPERAÇÃO DE DESBASTE PRÉ-COMERCIAL EM FUNÇÃO DO DAP (n = 290).	64
FIGURA 6 - A: CP _{pc} DOS TRATAMENTOS EM FUNÇÃO DO DAP. B: PERCENTUAL DE ENGAIOLAMENTO NOS TRATAMENTOS ESTUDADOS (n = 290).	66
FIGURA 7 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS CP _{pc} EM FUNÇÃO DA TU (A) E DA TAXA DE ADMINISTRAÇÃO (B) (n = 369).	67
FIGURA 8 - MÁQUINAS UTILIZADAS NO SISTEMA DE COLHEITA DE ÁRVORES INTEIRAS (FT). EM QUE: A: <i>FELLER</i> DIRECIONAL DE ESTEIRAS CATERPILLAR 324D COM CABEÇOTE PROCESSADOR SATCO 630. B: <i>SKIDDER</i> DE PNEUS JOHN DEERE 748H. C: <i>HARVESTER</i> JOHN DEERE 903K COM CABEÇOTE LOG MAX 10.000XT.	73
FIGURA 9 - MÁQUINAS UTILIZADAS NO SISTEMA DE TORAS CURTAS (CTL). A: MÁQUINA-BASE <i>HARVESTER</i> JOHN DEERE 909MH. B: CABEÇOTE <i>HARVESTER</i> WARATAH HTH624C. C: <i>FORWARDER</i> JOHN DEERE 1910E.....	74
FIGURA 10 - VARIAÇÃO DA P _{PMH} EM FUNÇÃO DA DECLIVIDADE (p > 0,05). A: <i>FELLER</i> DIRECIONAL (FT). B: <i>HARVESTER</i> (CTL).....	82
FIGURA 11 – RESÍDUOS PADRONIZADOS EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DE EXTRAÇÃO PARA AS MÁQUINAS DE EXTRAÇÃO. A: <i>SKIDDER</i> . B: <i>FORWARDER</i>	83

FIGURA 12 – VARIAÇÃO DA P_{PMH} DA EXTRAÇÃO EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DE EXTRAÇÃO, PARA DIFERENTES VOLUMES POR CICLO (V_{ciclo}) E POR TORA (V_{tora}) (DECLIVIDADE = 15,23°). A: <i>SKIDDER</i> . B: <i>FORWARDER</i> . LINHA PRETA: P_{PMH} . LINHA VERMELHA: ΔP_{PMH} . PARÂMETROS DOS MODELOS SÃO APRESENTADOS NA TABELA 14.	84
FIGURA 13 – VARIAÇÃO DO CUSTO DE EXTRAÇÃO (C_e) EM FUNÇÃO DA DE, PARA DIFERENTES VOLUMES POR CICLO (V_{ciclo}) E POR TORA (V_{tora}) (DECLIVIDADE = 15,23°). A: <i>SKIDDER</i> . B: <i>FORWARDER</i> . LINHA PRETA: C_e . LINHA VERMELHA: ΔC_e	86
FIGURA 14 – VARIAÇÃO DOS CUSTOS DE DERRUBADA E PROCESSAMENTO (C_{d+p}), EXTRAÇÃO (C_e), CONSTRUÇÃO DE ESTRADAS (C_c), MANUTENÇÃO DE ESTRADAS (C_m), PERDA DE ÁREA PRODUTIVA (C_{pap}) E CUSTO TOTAL DE PRODUÇÃO ($CP_{colheita+estradas}$) EM FUNÇÃO DA DENSIDADE DE ESTRADAS. A: SISTEMA FT. B: SISTEMA CTL.....	88
FIGURA 15 – MÁQUINAS DE COLHEITA UTILIZADAS NA ÁREA DE ESTUDO. A: <i>HARVESTER</i> , B: <i>FORWARDER</i> E C: CARREGADOR FLORESTAL.	97
FIGURA 16 – DESENHO ESQUEMÁTICO DA DISPOSIÇÃO DAS TORAS DEIXADAS PELO <i>HARVESTER</i> NOS RAMAIS DE EXTRAÇÃO E DAS PILHAS DOS SORTIMENTOS À MARGEM DA ESTRADA APÓS A EXTRAÇÃO.	98
FIGURA 17 – ESQUEMA ILUSTRATIVO DO DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E DIMENSÕES DOS BLOCOS UTILIZADOS NO ESTUDO.....	102
FIGURA 18 – VARIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DO <i>HARVESTER</i> EM FUNÇÃO DO VOLUME COMERCIAL (A) E VOLUME MÉDIO POR TORA DAS ÁRVORES (B). RELAÇÃO ENTRE O VOLUME COMERCIAL E VOLUME MÉDIO POR TORA DAS ÁRVORES (C). EQUAÇÕES SIGNIFICATIVAS PELA ANÁLISE DE VARIÂNCIA ($p < 0,01$).	109
FIGURA 19 – BOXPLOTS DA PRODUTIVIDADE DO <i>FORWARDER</i> NOS TRATAMENTOS ESTUDADOS EM CADA BLOCO DO DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.	111

FIGURA 20 – VARIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE (P_{PMH}) DO <i>FORWARDER</i> EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DE EXTRAÇÃO, PARA VOLUMES POR TORA (V_{tora}) DE 0,15 m ³ (A), 0,30 m ³ (B) E 0,45 m ³ (C). COEFICIENTES DAS EQUAÇÕES SÃO APRESENTADOS NA TABELA 28.	118
FIGURA 21 - VARIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE (P_{PMH}) DO CARREGADOR FLORESTAL EM FUNÇÃO DO VOLUME POR TORA (V_{tora}). EQUAÇÃO SIGNIFICATIVA PELA ANÁLISE DE VARIÂNCIA ($p < 0,01$).....	122
FIGURA 22 – ESTIMATIVAS DOS CUSTOS DE PRODUÇÃO DAS MÁQUINAS ESTUDADAS PARA A DISTÂNCIA DE EXTRAÇÃO DE 120 METROS, CONSIDERANDO DIFERENTES VOLUMES POR TORA (V_{tora}). ...	124
FIGURA 23 – VARIAÇÃO DO CUSTO TOTAL DE PRODUÇÃO DO SISTEMA (CP_{CTL}) PARA OS TRATAMENTOS ESTUDADOS EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DE EXTRAÇÃO, PARA VOLUMES MÉDIOS POR TORA (V_{tora}) DE 0,15 m ³ (A), 0,30 m ³ (B) E 0,45 m ³ (C).....	125

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – REGIMES DE MANEJO PARA ESPÉCIES DE <i>Pinus</i> UTILIZADOS EM DIFERENTES PAÍSES.	28
TABELA 2 – REGIMES DE MANEJO COMUMENTE APLICADOS EM POVOAMENTOS DE <i>PINUS</i> NO BRASIL.	29
TABELA 3 – COMPARAÇÃO DAS SEIS TÉCNICAS DE ESTUDO DE TEMPO E SEU GRAU TÍPICO DE ESCOPO E DURAÇÃO.	45
TABELA 4 – EXPRESSÕES UTILIZADAS PARA OS CÁLCULOS DOS CUSTOS OPERACIONAIS HORÁRIOS (COH) PARA DESBASTE PRÉ-COMERCIAL EM POVOAMENTOS DE <i>Pinus taeda</i>	57
TABELA 5 - CARACTERIZAÇÃO DENDROMÉTRICA DOS POVOAMENTOS DE <i>Pinus taeda</i> ANTES E DEPOIS DO DESBASTE PRÉ-COMERCIAL.	59
TABELA 6 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA DAS VARIÁVEIS OPERACIONAIS DO DESBASTE PRÉ-COMERCIAL EM <i>Pinus taeda</i>	62
TABELA 7 - MODELOS DE TEMPOS CONSUMIDOS SIGNIFICATIVOS ($p < 0,01$) PARA OS DIFERENTES TRATAMENTOS, NA OPERAÇÃO DE DESBASTE PRÉ-COMERCIAL DE POVOAMENTOS DE <i>Pinus taeda</i>	62
TABELA 8 - RESULTADOS DA MODELAGEM LINEAR GENERALIZADA PARA A INFLUÊNCIA DOS BLOCOS, TRATAMENTOS E DAP'S NAS VARIÁVEIS OPERACIONAIS ESTUDADAS.	63
TABELA 9 - CUSTOS OPERACIONAIS HORÁRIOS (COH) DO DESBASTE PRÉ-COMERCIAL EM <i>Pinus taeda</i>	65
TABELA 10 – CARACTERÍSTICAS DO POVOAMENTO, CONDIÇÕES OPERACIONAIS E DO TERRENO NA ÁREA DE ESTUDO.	72
TABELA 11 - ELEMENTOS DO CICLO DE TRABALHO DAS MÁQUINAS ESTUDADAS NOS SISTEMAS FT E CTL.	76
TABELA 12 – PRESSUPOSTOS ASSUMIDOS PARA O CÁLCULO DO CUSTO OPERACIONAL HORÁRIO DAS MÁQUINAS NOS SISTEMAS ESTUDADOS.	78
TABELA 13 – ERROS AMOSTRAIS, TEMPOS CONSUMIDOS NOS ELEMENTOS DO CICLO DE TRABALHO E ESTATÍSTICA DESCRITIVA PARA AS MÁQUINAS DOS SISTEMAS FT E CTL.	80

TABELA 14 – ESTATÍSTICAS DE AJUSTE DAS REGRESSÕES PARA ESTIMATIVA DA P_{PMH} DAS MÁQUINAS DE EXTRAÇÃO DOS SISTEMAS FT E CTL ($p < 0,001$).	83
TABELA 15 – VALORES MÉDIOS DA P_{PMH} , CUSTOS OPERACIONAIS HORÁRIOS E CONSUMO DE COMBUSTÍVEL PARA AS MÁQUINAS DOS SISTEMAS FT E CTL. PARA DECLIVIDADE = 15,23°; DISTÂNCIA DE EXTRAÇÃO = 64,56 m; VOLUME POR CICLO DO <i>SKIDDER</i> = 6,80 m ³ ; VOLUME POR TORA PARA O <i>FORWARDER</i> = 0,24 m ³ . PARÂMETROS DOS MODELOS SÃO APRESENTADOS NA TABELA 14.	85
TABELA 16 – CUSTOS OPERACIONAIS HORÁRIOS DAS MÁQUINAS DOS SISTEMAS FT E CTL.	85
TABELA 17 – CENÁRIOS DE DENSIDADE DE ESTRADAS ATUAL (DAE) E ÓTIMA (DOE) PARA OS SISTEMAS FT E CTL CONSIDERANDO O BALANCEAMENTO DOS SISTEMAS E CONDIÇÕES MÉDIAS DE ESTUDO (DECLIVIDADE = 15,23°, VOLUME POR CICLO DO <i>SKIDDER</i> = 6,8 m ³ E VOLUME MÉDIO POR TORA PARA O <i>FORWARDER</i> = 0,24 m ³).	89
TABELA 18 – ESPECIFICAÇÕES DOS SORTIMENTOS PRODUZIDOS NA ÁREA DE ESTUDO.	99
TABELA 19 – ELEMENTOS DO CICLO DE TRABALHO DO HARVESTER NA DERRUBADA E PROCESSAMENTO DE <i>Pinus taeda</i> .	100
TABELA 20 – ELEMENTOS DO CICLO DE TRABALHO DO <i>FORWARDER</i> NA EXTRAÇÃO DE TORAS DE <i>Pinus taeda</i> .	101
TABELA 21 – ELEMENTOS DO CICLO DE TRABALHO DO CARREGADOR FLORESTAL NO CARREGAMENTO DE TORAS DE <i>Pinus taeda</i> .	103
TABELA 22 – PRESSUPOSTOS ASSUMIDOS PARA O CÁLCULO DO CUSTO OPERACIONAL HORÁRIO DAS MÁQUINAS ESTUDADAS.	106
TABELA 23 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA E TEMPOS CONSUMIDOS NOS ELEMENTOS DO CICLO DE TRABALHO DO <i>HARVESTER</i> NA DERRUBADA E PROCESSAMENTO DE <i>Pinus taeda</i> .	107
TABELA 24 – INFLUÊNCIA DO VOLUME COMERCIAL (v_c) E OPERADORES NA PRODUTIVIDADE E TEMPOS CONSUMIDOS NOS ELEMENTOS DO	

CICLO DE TRABALHO DO <i>HARVESTER</i> PELA MODELAGEM LINEAR GENERALIZADA.	108
TABELA 25 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA E TEMPOS CONSUMIDOS NOS ELEMENTOS DO CICLO DE TRABALHO DO <i>FORWARDER</i> PARA OS TRATAMENTOS ESTUDADOS NA EXTRAÇÃO DE TORAS DE <i>Pinus taeda</i>	112
TABELA 26 – INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS, DISTÂNCIA DE EXTRAÇÃO (DE), DECLIVIDADE, VOLUME POR TORA (V_{tora}) E VOLUME POR CICLO (V_{ciclo}) NA PRODUTIVIDADE (P_{PMH}) E CONSUMOS DE TEMPO NOS ELEMENTOS DO CICLO DE TRABALHO DO <i>FORWARDER</i> PELA MODELAGEM LINEAR GENERALIZADA.	113
TABELA 27 – EQUAÇÕES PARA PREDIÇÃO DA PRODUTIVIDADE (P_{PMH}) DO <i>FORWARDER</i> NOS TRATAMENTOS ESTUDADOS E ESTATÍSTICAS DE PRECISÃO.	117
TABELA 28 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA E TEMPOS CONSUMIDOS NOS ELEMENTOS DO CICLO DE TRABALHO DO CARREGADOR FLORESTAL NO CARREGAMENTO DE TORAS DE <i>Pinus taeda</i>	120
TABELA 29 – CUSTOS OPERACIONAIS HORÁRIOS DO <i>HARVESTER</i> , <i>FORWARDER</i> E CARREGADOR FLORESTAL EM OPERAÇÕES DE CORTE FINAL DE <i>Pinus taeda</i>	122

LISTA DE SIGLAS

Anova - análise de variância

árv. ha⁻¹ - árvores por hectare

árv. PMH₀⁻¹ - árvores por hora-máquina produtiva livre de interrupções

C_c - custo com construção de estradas

C_e - custo de extração

C_m - custo com manutenção de estradas

COH - custo operacional horário

C_{pap} - custo com perda de área produtiva decorrente da alocação de estradas

CP_{colheita} - custo de produção da colheita (derrubada + processamento + extração)

CP_{colheita+estradas} - custo de produção considerando colheita (derrubada + processamento + extração) e estradas (construção, manutenção e perda de área produtiva)

CP_{CTL} - custo total de produção do sistema CTL (derrubada + processamento + carregamento)

CP_{estradas} - custo de produção com estradas

CP_{pc} - custo de produção do desbaste pré-comercial

CR - carregamento

CTL - sistema de colheita de toras curtas (*cut to length*)

CV - coeficiente de variação

DAE - densidade atual de estradas

dap - diâmetro à altura do peito ou à 1,3 m em relação ao solo

DE - distância de extração

DEA - tempo de deslocamento entre árvores

D_{estradas} - densidade de estradas

d_g - diâmetro médio quadrático

DOE - densidade ótima de estradas

DC - descarregamento

DR - tempo de derrubada da árvore

E% - percentual de engaiolamento

F - valor do teste F da Anova

F.M. - fator de Meyer

FT - sistema de colheita de árvores interias (*full tree*)

G - área basal ou transversal por hectare
h - altura total
ha PMH_0^{-1} - hectares por hora-máquina produtiva livre de interrupções
 $m^3 \text{ árv.}^{-1}$ - metros cúbicos por árvore
N - número de árvores por hectare
p - valor p
PC₂₅₀ - Desbaste pré-comercial seletivo 'pelo alto' com remoção de 250 árv. ha^{-1}
PC₃₇₅ - Desbaste pré-comercial seletivo 'pelo alto' com remoção de 375 árv. ha^{-1}
PC₅₀₀ - Desbaste pré-comercial seletivo 'pelo alto' com remoção de 500 árv. ha^{-1}
PC_b - Desbaste pré-comercial seletivo 'por baixo' com remoção de 250 árv. ha^{-1}
PMH₀ - hora-máquina produtiva livre de interrupções
P_{PMH} - Produtividade por hora-máquina produtiva (*Productivity per productive machine hour*)
P_{SMH} - produtividade por hora-máquina programada (*Productivity per schedule machine hour*)
r - coeficiente de correlação de Pearson
R\$ m^{-3} - reais por metro cúbico
R\$ PMH_0^{-1} - reais por hora-máquina produtiva livre de interrupções
R\$ SMH^{-1} - reais por hora-máquina programada
R²_{aj.} - coeficiente de determinação ajustado
SE - erro padrão da média
Syx - erro padrão da estimativa absoluto
Syx% - erro padrão da estimativa relativo
t PMH_0^{-1} - toneladas por hora-máquina produtiva livre de interrupções
TT - tempo total do ciclo de trabalho
TU - taxa de utilização
V - volume por hectare
VC - viagem carregado
V_c - volume comercial
V_{ciclo} - volume por ciclo
VDC - viagem durante o carregamento
VDD - viagem durante o descarregamento
v_i - volume médio individual
V_{tora} - volume por tora

VV - viagem vazia

W - valor para o teste de Shapiro-Wilk

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	23
1.1	OBJETIVOS	24
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	26
2.1	SILVICULTURA DO <i>PINUS TAEDA</i> L. NO BRASIL.....	26
2.2	DESBASTE E COLHEITA DO <i>PINUS</i>	30
2.2.1	Conceitos e definições.....	30
2.3	SISTEMAS DE COLHEITA.....	34
2.4	ESTUDO DO TRABALHO EM OPERAÇÕES FLORESTAIS.....	37
2.4.1	Conceito e histórico	37
2.4.2	Objetivos e tipos de estudo de medição do trabalho florestal.....	39
2.4.3	Medição do trabalho em operações florestais	43
3	CAPÍTULO 1 - DESEMPENHO OPERACIONAL E CUSTOS DE DESBASTE PRÉ-COMERCIAL SEMIMECANIZADO EM <i>PINUS TAEDA</i> L.	49
3.1	RESUMO	49
3.2	ABSTRACT	49
3.3	INTRODUÇÃO.....	50
3.4	MATERIAL E MÉTODOS	52
3.4.1	Área de estudo e delineamento experimental	52
3.4.2	Dados coletados	54
3.4.2.1	Inventário florestal	54
3.4.2.2	Operação de desbaste pré-comercial.....	55
3.4.3	Análise dos dados	55
3.4.3.1	Inventário florestal	55
3.4.3.2	Desempenho e custos das operações de desbaste pré-comercial.....	56
3.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
3.5.1	Caracterização do povoamento.....	59
3.5.2	Desempenho operacional do desbaste pré-comercial.....	60
3.5.3	Custos e qualidade da operação de desbaste pré-comercial.....	65
3.6	CONCLUSÕES.....	67
4	CAPÍTULO 2 – COMPARAÇÃO DE DOIS SISTEMAS MECANIZADOS DE COLHEITA EM OPERAÇÕES DE CORTE FINAL DE <i>PINUS TAEDA</i>.....	69
4.1	RESUMO	69

4.2	ABSTRACT	69
4.3	INTRODUÇÃO.....	70
4.4	MATERIAL E MÉTODOS	72
4.4.1	Características da área de estudo	72
4.4.2	Sistemas de colheita avaliados	72
4.4.3	Desempenho operacional.....	75
4.4.4	Análise dos dados e modelagem do desempenho operacional.....	76
4.4.5	Custos horários e de produção das operações de colheita	77
4.4.6	Comparação dos sistemas em diferentes cenários	78
4.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
4.5.1	Erros amostrais, estatística descritiva e tempos consumidos nos elementos do ciclo de trabalho	79
4.5.2	Influência das condições de trabalho na produtividade das máquinas	82
4.5.3	Custos da colheita	84
4.5.4	Cenários projetados.....	87
4.6	CONCLUSÕES.....	92
5	CAPÍTULO 3 - DESEMPENHO E CUSTOS DE UM SISTEMA MECANIZADO DE TORAS CURTAS CONSIDERANDO DIFERENTES SORTIMENTOS.....	93
5.1	RESUMO	93
5.2	ABSTRACT	93
5.3	INTRODUÇÃO.....	94
5.4	MATERIAL E MÉTODOS	96
5.4.1	Área de estudo	96
5.4.2	Estudo do trabalho e procedimento amostral	97
5.4.2.1	Corte.....	100
5.4.2.2	Extração	101
5.4.2.3	Carregamento.....	103
5.4.2.4	Análise dos dados	104
5.4.3	Custos	106
5.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	107
5.5.1	Desempenho operacional.....	107
5.5.1.1	Corte.....	107
5.5.1.2	Extração	110
5.5.1.3	Carregamento.....	120

5.5.2	Custos	122
5.6	CONCLUSÕES.....	127
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	128
	REFERÊNCIAS	131

1 INTRODUÇÃO GERAL

O manejo dos povoamentos de *Pinus taeda* L. destinados ao uso múltiplo da madeira envolve ao decorrer de longas rotações, uma série de decisões sobre o tipo e quais operações florestais devem ser implementadas nas várias fases de desenvolvimento do povoamento. Essas operações têm como objetivo intervir nas variáveis-chave do povoamento visando regular a competição entre os indivíduos, melhorar as condições de sítio, reestabelecer o crescimento e proporcionar maior qualidade às árvores remanescentes, principalmente, àquelas que irão permanecer até o final da rotação.

Portanto, para atingir os objetivos da produção florestal no referido regime de manejo, é imprescindível a adoção de prescrições que imponham a necessidade de realização de cortes intermediários, denominados desbastes, antes da ocorrência do corte final do povoamento. Dessa maneira, a dinâmica em que as operações florestais são condicionadas, tende a ser diferente do que é observado em regimes de manejo de curta rotação.

No caso dos desbastes, as condições operacionais são mais complexas e onerosas, sobretudo em intervenções iniciais, devido às árvores remanescentes limitarem o acesso e mobilidade de maquinário no interior do povoamento. Não obstante, o pequeno tamanho das árvores e os cuidados para não causar danos nos indivíduos remanescentes resultam em baixo desempenho operacional. Isso ocasiona elevados custos de produção e, em muitas situações, inviabiliza economicamente a atividade em função da madeira colhida, comumente, possuir baixo valor comercial.

Já a operação de corte final, tem fundamental importância e influência na rentabilidade florestal, pois, é a etapa da produção onde a madeira de maior valor agregado é colhida. As condições de trabalho tendem a permitir um alto desempenho operacional e menores custos de produção em relação aos desbastes, pois, geralmente, é pequeno o número de árvores por hectare que remanesce até o momento dessa operação. Dessa maneira, não há restrições de espaço de trabalho e as árvores possuem maiores dimensões.

Entretanto, em decorrência do elevado volume individual das árvores, há maiores riscos de segurança na derrubada das mesmas, implicando em necessidade do uso de técnicas específicas para a realização da atividade, além de ser maior a frequência de quebra de ponteiros das árvores e desperdício de madeira. Também,

devido ser produzido uma grande variedade de sortimentos de toras, tende a ser mais complexo os aspectos operacionais relacionados à pré-extração, empilhamento e organização da madeira.

No entanto, a literatura brasileira ainda carece de informações acerca das operações de desbaste e corte final aplicadas aos povoamentos de *Pinus taeda* L. manejados em longas rotações. Além disso, é limitada a empregabilidade de dados advindos de fabricantes ou relatados em trabalhos desenvolvidos em outros países, devido às diferenças em termos de sistema silvicultural, clima, capacidade de mão de obra e etc.

Desse modo, diante das particularidades e dificuldades associadas à essas operações, justifica-se o estudo de alternativas operacionais que garantam ao empreendimento florestal, dentro da realidade brasileira, maior segurança, produtividade e, assim, maior competitividade e retorno financeiro. Porém, também, é necessário entender as relações entre os fatores do processo, desempenho das máquinas e custos operacionais, com vistas à racionalização e otimização dos recursos utilizados em conformidade com as condições operacionais.

Nesse contexto, com o objetivo de estudar alternativas operacionais para a execução dessas operações, o presente estudo foi dividido em três capítulos: Capítulo 1 - Desempenho operacional e custos de desbaste pré-comercial semimecanizado em *Pinus taeda* L.; Capítulo 2 – Comparação de dois sistemas mecanizados de colheita em operações de corte final de *Pinus taeda*; e, Capítulo 3 - Desempenho e custos de um sistema mecanizado de toras curtas considerando diferentes sortimentos.

1.1 OBJETIVOS

Esse trabalho utilizou diferentes abordagens do estudo do trabalho aplicado às operações florestais e teve os seguintes objetivos:

- Avaliar o efeito de diferentes métodos de seleção das árvores e intensidades de desbaste na produtividade, custos e percentual de engaiolamento de árvores nas operações de desbaste pré-comercial semimecanizado em povoamentos de *Pinus taeda*.

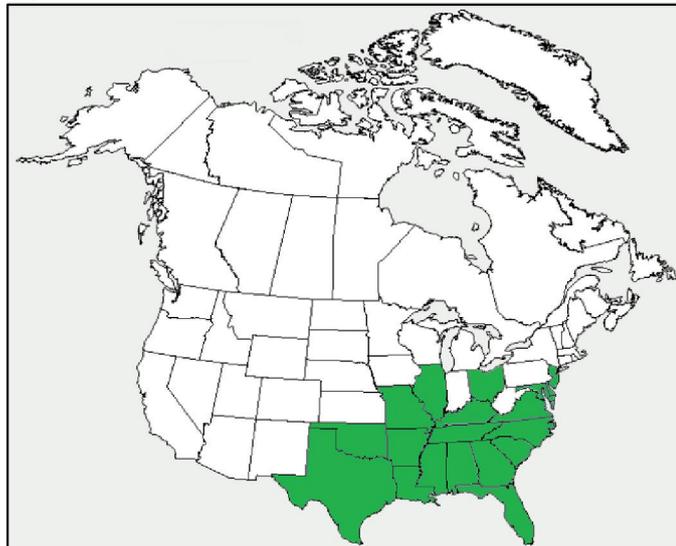
- Realizar comparação técnica e de custos dos sistemas mecanizados de toras curtas (CTL) e árvores inteiras (FT) em operações de corte final em povoamentos de *Pinus taeda* manejados em longas rotações.
- Avaliar o efeito de métodos de trabalho na etapa de extração e variáveis operacionais na produtividade e custos de um sistema mecanizado de toras curtas, no corte final de povoamentos de *Pinus taeda* manejados em longas rotações.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 SILVICULTURA DO *Pinus taeda* L. NO BRASIL

O *Pinus taeda* L. ou do inglês “loblolly pine” ocorre naturalmente em diversos estados do Atlântico médio e sul dos Estados Unidos da América e tem uma das mais extensas geografias dentre os pinheiros do sul. Essa espécie tem distribuição que vai do Texas até a Florida central (28° N) a leste e, para o norte até Delaware (39° N) (FIGURA 1) (SCHULTZ, 1997). Sua região de ocorrência natural é caracterizada como úmida, temperada quente com verões longos e quentes e invernos suaves. Nessa região, a temperatura e precipitação médias anuais variam de 13 a 24°C e 1.020 a 1.520 mm, respectivamente. O período sem neve varia de 5 a 10 meses (BAKER; LANGDON, 1991).

FIGURA 1 – DISTRIBUIÇÃO NATURAL DO *Pinus taeda* L. NOS ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA.



FONTE: adaptado de Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) (2018).

Essa é a espécie mais importante comercialmente no sudeste dos Estados Unidos. Em decorrência do seu rápido crescimento e adaptabilidade foi plantada em diversos países (Argentina, Austrália, Brasil, China, Nova Zelândia e África do Sul) (SCHULTZ, 1997; HARMS et al., 2000).

No Brasil, o manejo inadequado da *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze e o uso do solo para agricultura e pecuária impediram uma produção sustentável dessa

espécie, levando os madeireiros a buscarem fontes alternativas de matéria-prima (LIMA, 2014).

Nesse contexto, em meados da década de 60, o cultivo comercial do *Pinus taeda* e outras espécies desse gênero foi impulsionado no país, por meio da promulgação da lei de incentivos fiscais pelo governo (KRONKA et al., 2005). Na atualidade, o Brasil tem um dos maiores programas de manejo do gênero *Pinus* do mundo (HARMS et al., 2000).

No sul do país, essa espécie tem sido intensamente cultivada nas últimas seis décadas (DOBNER JR., 2014), pois encontra condições ideais de crescimento desde o Rio Grande do Sul até o centro do Paraná e sul de São Paulo. Essas condições englobam solos ligeiramente ácidos, invernos frios e chuvas uniformemente distribuídas durante o ano (KRONKA et al., 2005).

No ano de 2016, o Brasil liderou o ranking de produtividade florestal do gênero *Pinus*, com uma média de $30,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. No mesmo ano, os plantios desse gênero ocupavam cerca de 1,6 milhão de hectares no país, concentrando-se principalmente nos estados do Paraná (42%), Santa Catarina (34%) e Rio Grande do Sul (12%) (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ, 2017).

O objetivo inicial do estabelecimento das plantações de *Pinus* no Brasil era produzir matéria-prima para a indústria de celulose e papel. No entanto, a utilização de tratamentos silviculturais como o desbaste e a poda possibilitaram a produção de madeira de melhor qualidade a partir desses plantios. Dessa forma, de acordo com os objetivos de produção, diferentes regimes de manejo foram estabelecidos com o passar do tempo na silvicultura brasileira (DOBNER JR., 2014).

Regime de manejo pode ser definido como a combinação da densidade inicial de plantio, regimes de desbaste e/ou podas e tempo de rotação do povoamento (AHRENS, 1987). O regime de manejo ao qual a floresta foi ou está sendo submetida determina a variedade dos produtos madeireiros produzidos ao longo da rotação das plantações florestais. Portanto, esses produtos são consequência direta das decisões de médio e longo prazo tomadas no passado pelos gestores florestais (ARCE, 2000; KOHLER et al., 2015). Dobner Jr (2014) elencou alguns regimes de manejo utilizados para o gênero *Pinus* mundialmente (TABELA 1) e no Brasil (TABELA 2, p. 29).

TABELA 1 – REGIMES DE MANEJO PARA ESPÉCIES DE *Pinus* UTILIZADOS EM DIFERENTES PAÍSES.

País (espécie)	Idade (anos)	Operação	Estoque (ár. ha ⁻¹)	IMA (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)
Estados Unidos da América (<i>P. taeda</i>)	0	plantio	1.090	10 - 15
	22	desbaste	500	
	30	desbaste	250	
	35	corte final	-	
Chile (<i>P. radiata</i>)	0	plantio	1.250	10 - 24
	5	poda até 2,2 m	700	
	8	poda até 4 m	450	
	8	desbaste	600	
	9	poda até 5,5 m	400	
	10	poda até 7,9 m	250	
	13	desbaste	400	
25	corte final	-		
Nova Zelândia (<i>P. radiata</i>)	0	plantio	1.000	25 - 30
	6	poda até 3,5 m	375	
	7 - 8	poda até 5,6 m	375	
	7 - 8	desbaste pré-comercial	750	
	10	desbaste pré-comercial	375	
África do Sul (<i>P. patula</i>)	30	corte final	-	10 - 25
	0	plantio	1.111	
	3 - 4	poda até 2 m		
	4 - 6	poda até 4 m		
	5 - 7	poda até 6 m		
	8 - 10	desbaste	500	
12 - 15	desbaste	300		
Argentina (<i>P. taeda</i>)	30	corte final	-	18 - 30
	0	plantio	833 - 1.666	
	3 - 4	poda até 2 m	600 - 800	
	3 - 4	desbaste	800	
	6 - 7	poda até 4 m	400	
	6 - 7	desbaste	600	
	6 - 7	poda até 6 m	300	
8 - 10	desbaste	450		
14 - 16	desbaste	250		
20 - 29	corte final	-		

FONTE: adaptado de Kurtz; Ferruchi, 2004; West, 2006; Koetze; Malan, 2009; Cubbage et al., 2007; Cubbage et al., 2010; Riu, 2011 apud Dobner Jr (2014).

Legenda: IMA = incremento médio anual.

O regime *pulpwood* é o mais usado no Brasil, sendo o mais simples e que oferece a maximização do volume por unidade de área em curtas rotações. Entretanto, esse regime de manejo produz sortimentos de menor valor agregado, uma vez que, seu objetivo é a produção de biomassa (DOBNER JR, 2014; LIMA, 2014). O regime *utility* reportado por Mainardi et al. (1996) é intermediário, no qual desbastes são aplicados nos povoamentos para uma rotação semelhante à do *pulpwood*.

TABELA 2 – REGIMES DE MANEJO COMUMENTE APLICADOS EM POVOAMENTOS DE *PINUS* NO BRASIL.

Regime	Idade (anos)	Operação	Estoque (árv. ha ⁻¹)	Observações
<i>Pulpwood</i>	0	Plantio	1.600 - 1.800	
	15 - 20	Corte raso	-	
<i>Utility</i> (Mainard et al., 1996)	0	Plantio	1.666	
	~8	Desbaste ¹	variável	G = 40 m ² ha ⁻¹
	~12	Desbaste ²	variável	G = 40 m ² ha ⁻¹
	15 - 16	Corte final	-	
<i>Clearwood</i> Dobner Jr (2014)	0	Plantio	1.666	
	3	Poda até 1 m	1.666	
	4	Poda até 2,5 m	1.666	
	5	Poda até 3,5 m	1.000	
	6	Poda até 5,7 m	1.000	
	~7	Desbaste ³	1.100	G = 40 - 45 m ² ha ⁻¹
	~10	Desbaste ³	750	
	~13	Desbaste ³	450	
	~16	Desbaste ³	350	
	~20	Desbaste ³	250	
	25 - 30	Corte final	-	

FONTE: adaptado de Dobner Jr (2014).

Legenda: G = área basal por hectare.

¹ área basal é reduzida para 25 m² ha⁻¹ com o uso da combinação de desbaste sistemático (3° linha) e seletivo 'por baixo'.

² área basal é reduzida para 25 m² ha⁻¹.

³ todos os desbastes objetivam a redução da área basal de 40 – 45 para 30 m² ha⁻¹ com a combinação de desbaste sistemático e seletivo 'pelo alto'.

No caso do regime denominado *clearwood*, como o objetivo é produzir toras com maiores dimensões e com alto valor de mercado, a rotação adotada é longa, são utilizadas podas (obtenção das duas primeiras toras livres de nós) e o número de desbastes realizados é maior (DOBNER JR, 2014).

Dessa forma, sob o ponto de vista operacional, as características englobadas nos diferentes regimes de manejo determinam quais operações (1° desbaste, 2° desbaste, corte raso/final, etc) serão realizadas durante a rotação dos povoamentos. Ademais, as prescrições impostas pelo regime de manejo exercem influência direta na dinâmica dessas operações, pois determinam aspectos fundamentais como: espaçamento das árvores, volume/peso individual, volume por unidade de área, diâmetro da base da árvore e dos galhos, altura de copa, número e características dos sortimentos produzidos, entre outras (MALINOVSKI et al., 2006).

2.2 DESBASTE E COLHEITA DO *Pinus*

2.2.1 Conceitos e definições

A colheita florestal possui evidente importância econômica, ambiental e social no processo produtivo de madeira a partir de florestas plantadas (ANDRADE, 1998). Essa atividade é a mais importante do ponto de vista econômico, devido à sua alta participação no custo final da madeira e aos riscos de perdas envolvidos. Juntamente com o transporte, a colheita representa mais da metade do custo total da madeira posta em fábrica (MACHADO, 1989; MACHADO; LOPES, 2000; DINIZ et al., 2018).

Na atualidade, grande parte dessa atividade passou a ser realizada de forma mecanizada. A mecanização apesar de ter possibilitado aumentos significativos na produtividade da colheita e melhorias nas condições de trabalho dos trabalhadores florestais, também levou ao acréscimo do tráfego de máquinas de grande porte nos povoamentos florestais, o que contribui para o aumento de impactos ambientais, como o incremento da compactação e desequilíbrios nas características físicas, químicas e biológicas do solo (DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1996; LOPES et al., 2006; AMPOORTER et al., 2010). Além disso, as atividades de colheita florestal podem oferecer diversos riscos à segurança e ergonomia dos trabalhadores florestais, o que evidencia sua importância social (SCHETTINO, 2016).

Machado et al. (2014) definem a colheita florestal como um conjunto de operações efetuadas no maciço florestal, que visa preparar e levar a madeira até o local de transporte, por meio de técnicas e padrões estabelecidos, com a finalidade de transformá-la em produto final. As etapas que compõem a colheita são: corte, extração e carregamento (ROBERT, 2013).

Dentre as operações aplicadas à povoamentos manejados para o uso múltiplo da madeira estão os desbastes e o corte final dos povoamentos (AHRENS, 1987; ARCE, 2000). Apesar dos desbastes serem, na maioria das vezes, operações de colheita florestal, isso nem sempre é verdade. No caso de alguns desbastes em idades precoces, denominados pré-comerciais, a madeira não é extraída e aproveitada comercialmente, o que por sua vez, distancia-os do conceito de colheita florestal, sendo operações que visam apenas atender aspectos silviculturais ou de manejo (AHRENS, 1992).

Os desbastes consistem na eliminação planejada, racional e criteriosa de parte das árvores de um povoamento, sendo um dos tratamentos silviculturais mais importantes no manejo de florestas plantadas (RIBEIRO, 2002; DAVEL, 2009; DOBNER JR; HUSS, 2015). A execução de desbastes permite a regulação da competição entre as árvores e possibilita uma melhor distribuição dos fatores de crescimento (água, luz e nutrientes), permitindo a diversificação de produtos madeireiros e a obtenção de árvores com maior qualidade e valor agregado ao final do ciclo produtivo (FINGER; SCHNEIDER, 1999).

Em relação ao aspecto operacional, os desbastes mecanizados têm se mostrado complexos e onerosos do ponto de vista econômico (LOPES et al., 2016), pois as árvores remanescentes limitam a mobilidade das máquinas no interior do povoamento (SPINELLI; NATTI, 2009). Além disso, o pequeno tamanho das árvores e a necessidade de cuidado para não danificar os indivíduos que remanescerão fazem com que essas operações tenham baixas produtividades, o que eleva os custos de colheita (SPINELLI, 2004). Ademais, os produtos obtidos nessas operações, comumente, possuem baixo valor comercial (BELBO, 2008).

Tendo em vista a limitação do espaço de trabalho nessas operações, os desbastes podem ser classificados em 'sistemáticos', 'seletivos' e 'mistos' (sistemático + seletivo) (RIBEIRO, 2002). O desbaste sistemático não tem relação com os critérios de manejo adotados para a condução dos povoamentos e consiste basicamente na colheita sistemática de linhas de plantio em intervalos pré-determinados. Esse tipo de desbaste tem como objetivo manejar o espaço de trabalho e facilitar o acesso dos maquinários de colheita ao interior do povoamento. Portanto, sua intensidade é determinada de acordo com as máquinas a serem usadas na operação (SPINELLI, 2004; DOBNER JR; HUSS, 2015).

Por outro lado, os desbastes seletivos são realizados sob a consideração de aspectos do manejo e podem ser classificados em desbastes seletivos 'por baixo' e 'pelo alto', de acordo com o critério de seleção das árvores a serem retiradas do povoamento (LAGESON, 1997; SMITH *et al.*, 1997).

No desbaste seletivo 'por baixo' prioriza-se a retirada de indivíduos de qualidade inferior do povoamento (árvores suprimidas, dominadas, bifurcadas, tortuosas ou com danos causados por pragas) (SERPE et al., 2018). Nesse tipo de desbaste, apesar de uma evidente melhoria visual na qualidade do povoamento, observa-se que as árvores remanescentes recebem pouco ou nenhum espaço

adicional para o crescimento de suas copas (DOBNER JR; HUSS, 2015). Além disso, como o tamanho das árvores colhidas é pequeno, espera-se que a produtividade da colheita e o valor da madeira colhida sejam menores em relação às operações de desbaste ‘pelo alto’ (SPINELLI, 2004).

Diferentemente do desbaste seletivo ‘por baixo’, no desbaste ‘pelo alto’, o primeiro passo é definir quais são as árvores de maior potencial futuro, que são indivíduos dominantes, de boa qualidade e homoganeamente distribuídos no povoamento. A partir de então, são identificadas as principais concorrentes, que são, necessariamente, indivíduos bem desenvolvidos, que, por algum detalhe, não foram selecionados como árvores potenciais. Então, as árvores concorrentes são removidas para que as potenciais possam desenvolver suas copas sem restrição de espaço (DOBNER JR; HUSS, 2015).

No Brasil, os desbastes, quando realizados, são comumente sistemáticos (3ª a 9ª linha) combinados ao seletivo ‘por baixo’. Por meio do desbaste ‘por baixo’, completa-se o peso de desbaste removendo-se as árvores inferiores do povoamento, de acordo com o regime de manejo (DOBNER JR, 2014). Quando realizado de forma seletiva, o desbaste ‘por baixo’ tem sido o mais relatado no manejo de pinus em estudos científicos nacionais (BERTOLOTTI et al., 1983; ELESBÃO; SCHNEIDER, 2011 DAVID et al., 2016; RODRIGUES et al., 2017; SERPE et al., 2018). O desbaste seletivo ‘pelo alto’ também foi reportado em algumas pesquisas brasileiras, apesar de não ser tão difundido como o desbaste ‘por baixo’ no país (NOVACK JUNIOR, 2018; DOBNER et al., 2018).

Além das classificações supracitadas, Spinelli (2004) distingue os desbastes em ‘comercial’ e ‘pré-comercial’, de acordo com os aspectos econômicos que envolvem a execução da operação. Nos desbastes ‘comerciais’, o valor da colheita é suficiente para cobrir os custos da operação, bem como, em alguns casos, pode gerar lucro, o que justifica a extração e transporte da madeira colhida.

O desbaste pré-comercial (da língua inglesa ‘*thin to waste*’), também conhecido como reespaçamento (ROLLINSON, 1988) e desbaste desperdício (AHRENS, 1987) tem o propósito de somente atender aos aspectos de manejo dos povoamentos, visando exclusivamente os benefícios futuros de estímulo do crescimento das árvores remanescentes, em função da redução da competição nos povoamentos e melhoria da estabilidade da floresta (SPINELLI, 2004).

Nesse tipo de intervenção não há o aproveitamento comercial das árvores derrubadas. Portanto, não há geração de receita a partir de produtos obtidos do povoamento, o que não proporciona subsídios aos custos das operações de derrubada das árvores (AHRENS, 1987). Segundo Ahrens (1992), essas operações tem um custo associado à sua realização, ou seja, devem ser tratadas como um investimento que se faz ao povoamento remanescente ao desbaste. Entretanto, espera-se que a liberação das árvores que remanescerão no povoamento propicie aumento no crescimento e valorização da madeira a ser colhida nos desbastes comerciais posteriores e corte final do povoamento.

O desbaste pré-comercial normalmente é realizado em povoamentos muito jovens e a madeira possui baixo valor comercial (LIGNÉ et al., 2005). Essas operações podem ser realizadas tanto em povoamentos onde a regeneração natural foi conduzida (COELHO E FINGER, 1997; FLACH, 2007) quanto em povoamentos em que o plantio de mudas foi realizado (LISITA et al., 1997).

Alguns estudos científicos reportam a utilização dessa prática em povoamentos de *Pinus taeda* (PEZUTTI et al., 2016), *Pinus elliottii* (COELHO; FINGER, 1997; CARDOSO; FLACH, 2007; ARCE, 2010), *Toona ciliata* (BUFALINO et al., 2012) e *Tectona grandis* (NOVAES, 2009). Segundo Ahrens (1992), comumente, o desbaste pré-comercial era realizado de forma seletiva seguindo o método de seleção 'por baixo' no passado, porém, essa prescrição era pouco difundida entre as empresas florestais.

No entanto, na atualidade, as dificuldades técnico-econômicas acerca do primeiro desbaste 'comercial' mecanizado em povoamentos de pinus têm motivado algumas empresas florestais à estudar viabilidade de implementação do desbaste pré-comercial. Spinelli (2004) menciona que o primeiro desbaste é o mais crítico, porque produz árvores muito pequenas, o que diminui a produtividade e encarece essa operação, e ainda, tem que liberar as árvores remanescentes em um povoamento mais denso em relação aos desbastes posteriores. Portanto, é mais provável que essa operação deva ser realizada de forma pré-comercial.

Os desbastes posteriores apresentam maior facilidade de implementação, pois o povoamento não é excessivamente denso oferecendo mais espaços para as manobras. Além disso, nessas operações são colhidos produtos com maiores valores de mercado (SPINELLI, 2004).

Entretanto, os produtos mais valiosos são obtidos no corte final da floresta, que é a operação que encerra um ciclo de produção florestal, tendo importância fundamental na determinação da rentabilidade florestal. Nesse caso, o valor da madeira colhida é ainda maior e o custo com colheita menor em relação aos desbastes, pois não há restrição no espaço de trabalho e as árvores possuem maiores dimensões (ARCE et al., 2004; SPINELLI, 2004).

Tendo em vista que as diversas operações executadas nos povoamentos exercem fundamental importância sobre a rentabilidade dos ativos florestais, torna-se imprescindível analisar operacionalmente máquinas e sistemas de colheita, com o intuito de gerar informações consistentes como suporte às tomadas de decisão e subsídio ao planejamento dessas atividades (LACERDA et al., 2017; SCOPURSKI et al., 2017).

Os diferentes regimes de manejo empregados nas plantações florestais aliados às condições dos sítios florestais determinam o tamanho das árvores a serem colhidas no corte raso/final dos povoamentos, sendo essa uma das principais variáveis influentes na produtividade e custos dessas operações (SPINELLI et al., 2010; NAKAGAWA et al., 2010; VISSER & SPINELLI, 2012; WALSH & STRANDGARD, 2014).

Nesse contexto, alguns estudos do trabalho têm sido conduzidos no Brasil com o objetivo de determinar a capacidade e os custos de produção de máquinas e sistemas de colheita em povoamentos de pinus, para distintos regimes de manejo. A maior parte dessas pesquisas vem sendo realizada em regimes de manejo com rotações curtas (15 anos) que adotam nenhum ou poucos desbastes (até 2 desbastes), nos quais árvores de pequenas dimensões são colhidas no corte raso/final (LOPES et al., 2007; OLIVEIRA et al., 2009; SCOPURSKI et al., 2017). Por outro lado, poucos trabalhos científicos têm se preocupado com operações de corte final de povoamentos manejados em longas rotações (24 a 39 anos), dos quais são obtidas árvores com maiores volumes individuais e um maior número de produtos a partir da floresta (PEREIRA et al., 2015; SOUZA et al., 2018b).

2.3 SISTEMAS DE COLHEITA

O sistema de colheita florestal, por vezes reportado na literatura internacional como 'método de colheita' (*harvesting method*) (ADEBAYO et al., 2007; JIROUŠEK et

al., 2007) e ‘método de trabalho’ (*working method*) (SPINELLI, 2004) pode ser definido como o conjunto de atividades, integradas entre si, que permitem o fornecimento constante de madeira, nas quais deve-se buscar a máxima utilização das máquinas e evitar pontos de estrangulamento (MACHADO et al., 2014).

A classificação dos sistemas de colheita mais usada e difundida no Brasil foi proposta por Machado (1985) e diferencia os sistemas quanto à forma da madeira na fase de extração em: sistema de toras curtas (*cut-to-length, shortwood*), sistema de toras longas (*tree-length*), sistema de árvores inteiras (*full-tree*), sistema de árvores completas (*whole-tree*) e sistema de cavaqueamento (*chipping*). No entanto, internacionalmente, diversos autores têm utilizado o termo ‘*whole tree*’ para designar o sistema de árvores inteiras (ADEBAYO et al., 2007; WALMSLEY et al., 2009; SPINELLI; MAGANOTTI, 2010; TOLOSANA et al., 2018).

No Brasil, as operações de colheita de monocultivos florestais têm sido realizadas, predominantemente, pelos sistemas de colheita de toras curtas e árvores inteiras (SEIXAS; OLIVEIRA JÚNIOR, 2001).

O sistema escandinavo de toras curtas (OLIVEIRA JUNIOR; SEIXAS, 2006) é caracterizado pela realização de todas as atividades posteriores à derrubada (desgalhamento, destopo, traçamento e em alguns casos descascamento) no próprio talhão (ADEBAYO et al., 2007). Posteriormente, a extração das toras de até 7 m de comprimento é realizada na forma de baldeio (MALINOVSKI et al., 2014). Quando mecanizado, comumente, esse sistema é composto por *harvester* (derrubada e processamento) e *forwarder* (extração). Na atualidade esse é o modal de colheita mais utilizado no Brasil (SEIXAS; BATISTA, 2014) e em outros lugares do mundo (TIERNAN et al., 2004; JIROUŠEK et al., 2007; GHAFARIAN et al., 2012).

Nesse sistema, ambas as máquinas trafegam sobre os resíduos do processamento (folhas, galhos e topos), o que reduz potencialmente a compactação e erosão do solo, contribuindo ainda com a ciclagem de nutrientes (KELLOGG; BETTINGER, 1994; SPINELLI; MAGAGNOTTI, 2010). Ademais, apresenta outras vantagens como: maior versatilidade para o uso em operações de desbaste (SPINELLI, 2004), menor necessidade de densidade de estradas (BETTINGER; KELLOGG, 1993; SOUZA et al., 2018b) e pátios intermediários (BETTINGER; KELLOGG, 1993; SYUNEV et al., 2009).

Entretanto, a utilização desse sistema dificulta o aproveitamento da biomassa residual como fonte energética e a silvicultura após a colheita, pois os resíduos ficam

espalhados por toda a área, o que também aumenta os riscos de incêndios (MACHADO, 1989). Segundo Malinovski et al. (2014), esse sistema não era indicado para regiões com topografia acidentada, porém, atualmente tem-se a opção de utilizar guinchos de tração auxiliar (GTA) que possibilitam a colheita com o mesmo em declividades de até 80%.

O sistema de toras longas consiste na derrubada, desgalhamento e destopo da árvore no interior do talhão. Em seguida, o fuste (com mais de 7 m de comprimento) é arrastado para a margem do talhão ou pátio intermediário, onde é realizado o seu traçamento e empilhamento das toras (OLIVEIRA, 2013). As principais máquinas utilizadas nesse sistema são: motosserras, *harvesters*, *feller*, *skidders* ou *mini-skidders*, *slashers* e garras traçadoras (MALINOVSKI et al., 2014)

Assim como no de toras curtas, esse sistema proporciona os prós e contras da permanência de resíduos na área. Em condições topográficas desfavoráveis apresenta melhor desempenho das máquinas em relação ao sistema anteriormente citado. Porém, exige planejamento mais criterioso das operações para evitar pontos de estrangulamento (MACHADO, 1989).

Além disso, o sistema de toras longas pode ser considerado um dos mais baratos quando mecanizado e sua principal origem encontra-se nos países norteamericanos, onde cerca de 90 a 95% de toda a colheita da madeira até 1996 era realizada por esse sistema (MALINOVSKI et al., 2014).

A colheita pelo sistema de árvores inteiras implica na extração das árvores inteiras para a margem do talhão ou pátio intermediário após a derrubada, onde são processadas em vários produtos (SPINELLI, 2004).

Segundo Adebayo et al. (2006) o típico sistema mecanizado de árvores inteiras requer quatro máquinas: *feller-buncher*, *skidder*, processador e carregador florestal. O *feller-buncher* derruba e acumula as árvores em feixes, posteriormente o *skidder* realiza a extração na forma de arraste, e por fim, o processador processa as árvores à margem da estrada ou pátio intermediário.

As maiores empresas do Sul do Brasil utilizam esse sistema em suas operações devido ao baixo custo e à tradição de uso por empresas americanas (MALINOVSKI et al., 2014).

Quando objetiva-se o aproveitamento da biomassa residual, esse sistema é recomendado, pois os resíduos ficam acumulados à margem do talhão o que facilita sua utilização. Ademais, elimina a maior parte do material combustível dos talhões,

prevenindo incêndios florestais e facilitando as operações silviculturais posteriores (ADEBAYO, et al., 2006).

Entretanto, suas maiores limitações estão relacionadas à maior exigência de planejamento das operações, de modo a evitar gargalos nas atividades do sistema, aumento da exportação de nutrientes dos sítios florestais e necessidade de adoção de alto nível de mecanização (MALINOVSKI et al., 2002).

A escolha do melhor sistema de colheita a ser implementado é mais complexa do que parece, pois envolve a análise de aspectos ambientais (topografia do terreno, condições climáticas e tipo de solo), do povoamento (espécie, origem do povoamento regime de manejo adotado e qualidade do plantio) e operacionais (nível de treinamento dos operadores, consumo de energia, tipo de operação, rede viária, uso final da madeira e interface com a silvicultura) (MALINOVSKI et al., 2014).

Segundo Oliveira (2013) algumas empresas têm demonstrado preocupação na definição do melhor sistema de colheita a ser empregado, pois o mesmo deve ser balanceado de acordo com as características da floresta, tipo de máquinas a serem utilizadas e intensidade das operações de colheita. A influência exercida por esse conjunto de fatores irá se refletir na eficiência, produtividade, sustentabilidade e retorno financeiro das operações a serem realizadas (AKAY et al., 2004; ROBERT, 2013).

No Brasil, as condições de colheita são muito variáveis e ainda existem poucos dados a respeito da capacidade produtiva das máquinas usadas nessas operações. Estimativas de produtividade e custos fornecidas pelos fabricantes ou obtidas em trabalhos realizados em outros países são frágeis, considerando-se divergências no sistema silvicultural, clima e qualificação dos operadores, dentre outros fatores (BRAMUCCI, 2001). Portanto, é evidente a importância de estudos que se preocupem em analisar máquinas/sistemas de colheita em condições que retratem a realidade florestal brasileira (OLIVEIRA, 2013).

2.4 ESTUDO DO TRABALHO EM OPERAÇÕES FLORESTAIS

2.4.1 Conceito e histórico

Magagnotti e Spinelli (2012) definem o estudo do trabalho como um estudo sistemático dos aspectos técnicos, psicológicos, fisiológicos, sociais e organizacionais

do trabalho. Ele fornece um exame crítico das formas existentes e propostas de se realizar o trabalho.

O estudo do trabalho que em algumas de suas aplicações é sinônimo de estudo de tempos e movimentos (medição do trabalho) tem seus primeiros registros nos anos de 1881 e 1885, com Frederick Taylor e Frank B. Gilbreth. Taylor foi o precursor no desenvolvimento dos estudos de tempo, os quais tinham como principal objetivo determinar o tempo-padrão para executar uma tarefa específica. Já Gilbreth ocupou-se dos estudos de movimentos, que visavam encontrar o melhor método para a execução de dado trabalho (BARNES, 1977).

Segundo Magagnotti et al. (2013) esses mesmos conceitos foram refletidos na ciência do trabalho florestal à medida que se desenvolvia em uma área independente no final da década de 1920. Hoje, os estudos sobre o trabalho florestal ainda têm como um dos principais objetivos levar as operações à máxima eficiência. Desde o início, essa abordagem tem sido compartilhada entre cientistas do trabalho florestal em todo o mundo.

Atualmente, há um acordo geral na comunidade internacional de Engenharia Florestal em relação aos objetivos e métodos de estudo do trabalho (BJÖRHEDEN, 1991). Isso advém de uma forte cooperação internacional que se iniciou informalmente no final da década de 1950 e posteriormente foi formalizada por várias redes científicas, como o Conselho de Pesquisa Florestal Nórdica (*Nordic Forest Research Council*, NSR) e União Internacional de Organizações de Pesquisa Florestal (*International Union of Forest Research Organizations*, IUFRO) (SUNDBERG, 1988). No final da década de 1990, o pesquisador florestal internacional já tinha disponível vários documentos úteis para consultar, como a Nomenclatura do Estudo sobre o Trabalho Florestal da IUFRO (BJÖRHEDEN et al., 1995) e vários guias de instruções (SAMSET, 1990; BERGSTRAND, 1991; HARSTELA, 1991; OLSEN et al., 1998).

No Brasil, a principal publicação utilizada pelos pesquisadores do trabalho florestal é de 1988 e até os dias atuais não passou por atualizações (MACHADO; MALINOVSKI, 1988). No âmbito internacional, algumas publicações recentes trataram das terminologias, diretrizes e boas práticas na execução de estudos de tempos e movimentos em operações florestais (MAGAGNOTTI; SPINELLI, 2012; ACKERMAN et al., 2014).

2.4.2 Objetivos e tipos de estudo de medição do trabalho florestal

O estudo do trabalho é comumente dividido em duas partes, o estudo do método e, em seguida, a medição do trabalho. Uma vez que o método ótimo para a realização do trabalho foi estabelecido, inicia-se a medição do trabalho, de modo a determinar quanto tempo é despendido para concluir dada tarefa fazendo o uso do método otimizado (KANAWATY, 1992).

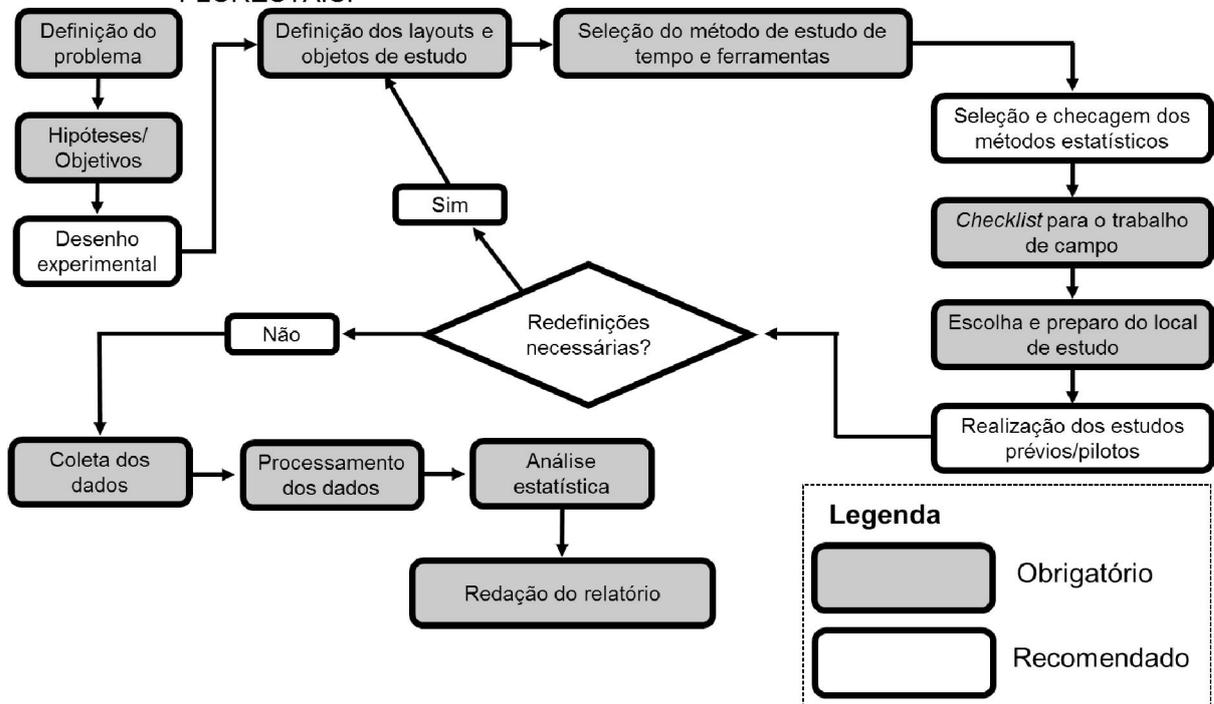
A medição do trabalho consiste na aplicação de técnicas destinadas a medir: a entrada de recursos no processo produtivo; os métodos e movimentos do trabalho e as saídas de produção. Dessa forma, o seu intuito é descrever a relação entre as entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*) de trabalho e a influência das variáveis do processo nessa relação. Frequentemente, a principal entrada de interesse é o tempo. Entretanto, outra entrada crucial é a energia, dependendo da finalidade do estudo. As saídas se referem à quantidade e qualidade do produto que foi produzido no processo (volume de madeira, massa de madeira, entre outros) (MAGAGNOTTI; SPINELLI, 2012).

Antes de qualquer estudo ser realizado, o objetivo precisa ser determinado. Objetivos claros garantem que o tempo e os recursos serão utilizados de forma eficiente e ajudam a desenvolver os resultados desejados. Alguns possíveis exemplos de objetivos são: localizar ineficiências em um determinado sistema de colheita; determinar a produtividade de um novo operador; comparar a produtividade de dois sistemas de colheita; avaliar o tempo de inatividade de uma máquina apontando as razões da inatividade e desenvolver modelos de produtividade para uma máquina específica (ACKERMAN et al., 2014).

A definição concisa dos objetivos deve ser guiada por alguns itens: 1) problema específico a ser resolvido ou conhecimento a ser adquirido; 2) uso previsto dos resultados do estudo e 3) recursos disponíveis. Por exemplo, a necessidade de precisão será diferente entre um estudo de baixo orçamento destinado a obter uma estimativa aproximada do desempenho esperado, e um estudo experimental em larga escala destinado a produzir diretrizes confiáveis para uso oficial. Por isso, é muito importante despendar tempo e consideração para formular o problema, para que ele atenda à expectativa do usuário final e ao orçamento disponível (MAGAGNOTTI; SPINELLI, 2012).

A FIGURA 2 ilustra uma sequência de etapas a serem seguidas para a realização de estudos de medição do trabalho. Entretanto, podem haver variações de acordo com o tipo de estudo a ser adotado.

FIGURA 2 – FLUXOGRAMA COM A SEQUÊNCIA DE ETAPAS A SEREM SEGUIDAS PARA A EXECUÇÃO DE UM ESTUDO DE MEDIÇÃO DO TRABALHO EM OPERAÇÕES FLORESTAIS.



FONTE: adaptado de Magagnotti; Spinelli (2012).

Antes de discorrer acerca dos tipos de estudos passíveis de utilização, é conveniente ressaltar que o desempenho das operações florestais é afetado por diversas variáveis (BRAMUCCI; SEIXAS, 2002; MALINOVSKI et al., 2006; FIEDLER et al., 2008).

Algumas dessas variáveis podem ser determinadas na execução dos estudos, sendo denominadas variáveis-alvo ou “fatores controláveis”, do inglês *target variables*. Essas variáveis podem ter efeitos fixos (variáveis nominais) ou aleatórios (variáveis contínuas) e são passíveis de controle. Contudo, também existem variáveis que simplesmente são passivamente recebidas e não possibilitam controle nos estudos. Essas variáveis são denominadas “variáveis incômodas” (*nuisance variable*) e também exercem influência sobre o desempenho das operações (MAGAGNOTTI; SPINELLI, 2012).

Nesse mesmo sentido, Wadouski (1987) distingue as variáveis que afetam a produtividade das operações em diretas e indiretas. As variáveis diretas são passíveis de identificação imediata, alguns exemplos são: volumes a serem extraídos, extensão da área a ser colhida, características dos fustes, porcentagem e diâmetro dos galhos, declividade, classificação dos solos, malha viária, distância de extração, características dos sortimentos produzidos, entre outras. As variáveis indiretas são de difícil determinação e a intensidade de como elas irão afetar o trabalho deve ser cuidadosamente estimada. Alguns exemplos são: grau de erodibilidade dos solos, estabilidade de áreas declivosas, necessidades impostas pelo manejo florestal, riscos à compactação do solo, variações climáticas bruscas, entre outras.

Ackerman et al. (2014) classificam os estudos de medição do trabalho de acordo com o escopo, objetivos e características experimentais, dividindo-os em estudos observacionais, estudos experimentais e estudos de modelagem. No entanto, esses estudos nem sempre tem caráter mutuamente exclusivo.

Nos estudos observacionais, também chamados de estudos descritivos (ACKERMAN et al., 2014), as variáveis influentes não são controladas (MAGAGNOTTI; SPINELLI, 2010; KANAWATY, 1992). Dessa forma, ele fornece evidências indicativas, ao invés de conclusivas sobre o efeito das variáveis-alvo. Entretanto, muitos estudos do trabalho florestal tem caráter observacional e oferecem compreensões valiosas sobre os processos estudados. Esse tipo de estudo serve para descrever o estado atual de um operador, máquina ou sistema de colheita (MAGAGNOTTI; SPINELLI, 2010).

Segundo Ackerman et al. (2014), os pontos fortes desse tipo de estudo são: análise dos dados relativamente simples, facilidade e rapidez de condução em relação aos estudos experimentais e de modelagem, e ainda, pode fornecer informações importantes acerca do processo. Todavia, esses estudos não podem ser usados para comparações, não tem rigor estatístico e fornecem resultados para um conjunto específico de condições. Portanto, os resultados podem mudar drasticamente em outras condições.

Em contraste, estudos experimentais envolvem uma maior capacidade de controlar variáveis do processo, com níveis que podem ser adequadamente organizados em um forte delineamento experimental. Os conhecimentos obtidos a partir desses estudos são mais fortes e confiáveis do que os obtidos em estudos observacionais. Delineamentos experimentais e análise estatística adequada

permitem contrastar o efeito das variáveis-alvo em relação ao efeito geral de todas as outras variáveis combinadas (MAGAGNOTTI; SPINELLI, 2012).

Segundo os mesmos autores, os delineamentos experimentais devem controlar as “variáveis incômodas” de forma eficiente e lógica, para o controle do viés. Existem quatro formas de tratar essas variáveis nos delineamentos experimentais:

a) **Manutenção constante:** ambientes simulados oferecem uma oportunidade ideal para conduzir o experimento perfeito. No entanto, os pesquisadores que trabalham com experimentos devem ter cuidado para não construir um delineamento experimental que seja artificial demais para refletir as condições operacionais reais. Outra forma, é considerar apenas condições constantes (por exemplo, analisar a extração de um dado sortimento com dimensões especificadas).

b) **Casualização:** consiste em alocar aleatoriamente os tratamentos aos diferentes níveis de “variáveis incômodas”. Segundo Ackerman et al. (2014), nesse caso, o viés é controlado através da casualização e essa abordagem é recomendada para comparar um fator sob o pressuposto de que as condições do sítio de estudo são homogêneas (isto é, não variam drasticamente umas das outras). O delineamento que utiliza apenas a casualização é denominado inteiramente casualizado e pode ser monofatorial (apenas um fator principal é testado) ou multifatorial (dois ou mais fatores principais são testados) (PRETZSCH, 2009).

c) **Bloqueamento:** é usado para reduzir variações sistemáticas conhecidas, de forma que nenhum tratamento seja privilegiado. Nesse caso, o viés sistemático é controlado através de uma combinação de blocos (bloqueamento) e o viés restante é controlado através de alocação aleatória de tratamentos nesses blocos (casualização) (CLEWER; SCARISBRICK, 2001). Os delineamentos em blocos ao acaso e quadrado latino usam os princípios de bloqueio e casualização. Esses tipos de delineamento também podem ser monofatorial ou multifatorial, de acordo com o número de fatores principais testados (ACKERMAN et al., 2014).

d) **Inclusão das “variáveis incômodas”:** desde que sejam passíveis de quantificação, essas variáveis podem ser adicionadas como variáveis-alvo adicionais. A partir da medição de seus níveis pode-se associá-las aos níveis das variáveis resposta. Essas relações são usadas para corrigir a análise.

Dependendo das características da “variável incômoda” incluída na análise, pode-se proceder de duas maneiras: bloqueio (para variáveis que assumem níveis fixos) ou “introdução de uma co-variável” (para variáveis contínuas).

Os estudos de modelagem são feitos para observar máquinas, operadores ou sistemas e criar um modelo de produtividade ou custo baseado em uma série de fatores de entrada. Esses fatores de entrada devem ser mensuráveis e preferencialmente contínuos. Exemplos de variáveis contínuas incluem diâmetro à altura do peito (dap), declividade, volume por tora, distância de extração, entre outros (ACKERMAN et al., 2014). Esse tipo de estudo visa determinar o efeito de co-variáveis (variáveis contínuas) na variável resposta (MAGAGNOTTI; SPINELLI, 2012).

Esses autores citam ainda um quarto tipo de estudo denominado comparativo, o qual contrapõe-se ao de modelagem, por visar divulgar efeitos de fatores fixos (variáveis nominais, por exemplo: operadores, diferentes máquinas, entre outros) ao invés de co-variáveis.

Entretanto, conforme comentado anteriormente, embora sejam classificados em diferentes categorias, os estudos de medição do trabalho podem não ser mutuamente exclusivos, ou seja, geralmente envolvem uma combinação de elementos comparativos e de modelagem. Um exemplo seria o uso da modelagem em estudos comparativos, quando esses forem realizados num ambiente florestal altamente variável, de forma a permitir comparações para as mesmas condições (por exemplo, tamanho de árvore, volume por tora, declividade e distância de extração) (ACKERMAN et al., 2014).

2.4.3 Medição do trabalho em operações florestais

Para falar da medição do trabalho, em um primeiro momento é conveniente distinguir os conceitos de produção e produtividade. A produção pode ser definida como a quantidade de produtos transformados ou criados, sem considerar os fatores de produção, representando apenas um resultado de um dado período de tempo. Enquanto a produtividade é dada pela relação entre a produção e os fatores de produção utilizados. O aumento da produtividade pode ser definido como a capacidade de se produzir mais utilizando-se menos tempo (MACHADO; MALINOVSKI, 1988).

Para Maganotti e Spinelli (2012) a produtividade, juntamente com os tempos consumidos são as principais variáveis resposta na medição do trabalho florestal. Esses autores definem a produtividade como sendo a razão entre a saída (m^3 , toneladas, hectares, entre outras unidades) e a entrada (tempo, segundos, minutos, horas) do trabalho. Enquanto, a relação inversa (entrada/saída) é denominada consumo de tempo por unidade produzida.

Dessa forma, o tempo é um elemento chave da produção e um recurso crucial que deve ser gerenciado. Ackerman et al. (2014) citam seis metodologias ou técnicas de amostragem de tempos que são comumente utilizadas:

- a) Estudo ao nível de turno (*shift level study*): a produção da operação é examinada de forma observacional com a conclusão de um turno de trabalho. Esta técnica é geralmente utilizada para estudos de observação, monitoramento ou acompanhamento a longo prazo da produtividade e interrupções.
- b) Estudo ao nível de parcela (*plot level study*): a unidade de observação consiste em uma parcela totalmente concluída, portanto, todo o tempo acumulado é registrado. A parcela a ser considerada pode ser, por exemplo, uma dada área ou número pré-determinado de árvores a ser colhido. Fernandes et al. (2013) utilizaram essa técnica para determinar a produtividade de um *harvester*.
- c) Estudo ao nível de ciclo (*cycle level study*): a unidade de observação é um ciclo de trabalho (por exemplo, a derrubada de uma árvore ou a extração de uma carga de toras).
- d) Estudo ao nível de elemento do ciclo (*element level study*): nesse caso, o ciclo de trabalho é dividido em elementos ou etapas funcionais individuais, das quais são registrados os tempos (MAGAGNOTTI; SPINELLI, 2012). Esse é o estudo que traz maior riqueza de detalhes e tem sido amplamente utilizado em diversos estudos da medição do trabalho florestal no Brasil e no mundo (SPINELLI et al., 2004; FIEDLER et al., 2008; GAFFARIYAN et al., 2012; KULAK et al., 2017; LOPES et al., 2017; ROBERT et al., 2017). Os registros podem ser efetuados por meio de duas técnicas: tempo individual e tempo contínuo. No tempo individual, o relógio é repostado a zero no final de cada elemento, o que não acontece no tempo contínuo (MACHADO; MALINOVSKI, 1988).

e) Amostragem do trabalho: também conhecida como estudo de frequência (MAGAGNOTTI; SPINELLI, 2012) e método de cronometragem de multimomento (MACHADO; MALINOVSKI, 1988). Essa técnica é usada para medir a participação dos elementos do ciclo de trabalho no consumo do tempo. Ela consiste em observar o processo em intervalos fixos ou aleatórios e registrar qual a etapa funcional previamente definida está sendo realizada pela equipe de trabalho naquele momento específico. Sua vantagem é possibilitar que um pesquisador acompanhe mais equipes ao mesmo tempo. No entanto, não oferece nenhuma informação sobre a duração do ciclo (MAGAGNOTTI; SPINELLI, 2012). No Brasil, alguns estudos utilizaram essa metodologia (FERNANDES et al., 2013; ROBERT, 2013).

f) Contagem do tempo e produção: é uma das técnicas mais simples para o estudo de medição do trabalho. O nível de observação é variável e pode ser um ciclo, uma série de ciclos ou um turno. A contagem de tempo e produção é usada por ser muito rápida e normalmente é feita manualmente com um observador no campo durante algumas horas.

A TABELA 3 resume os escopos, unidades de observação e duração das diferentes metodologias de estudo de tempos.

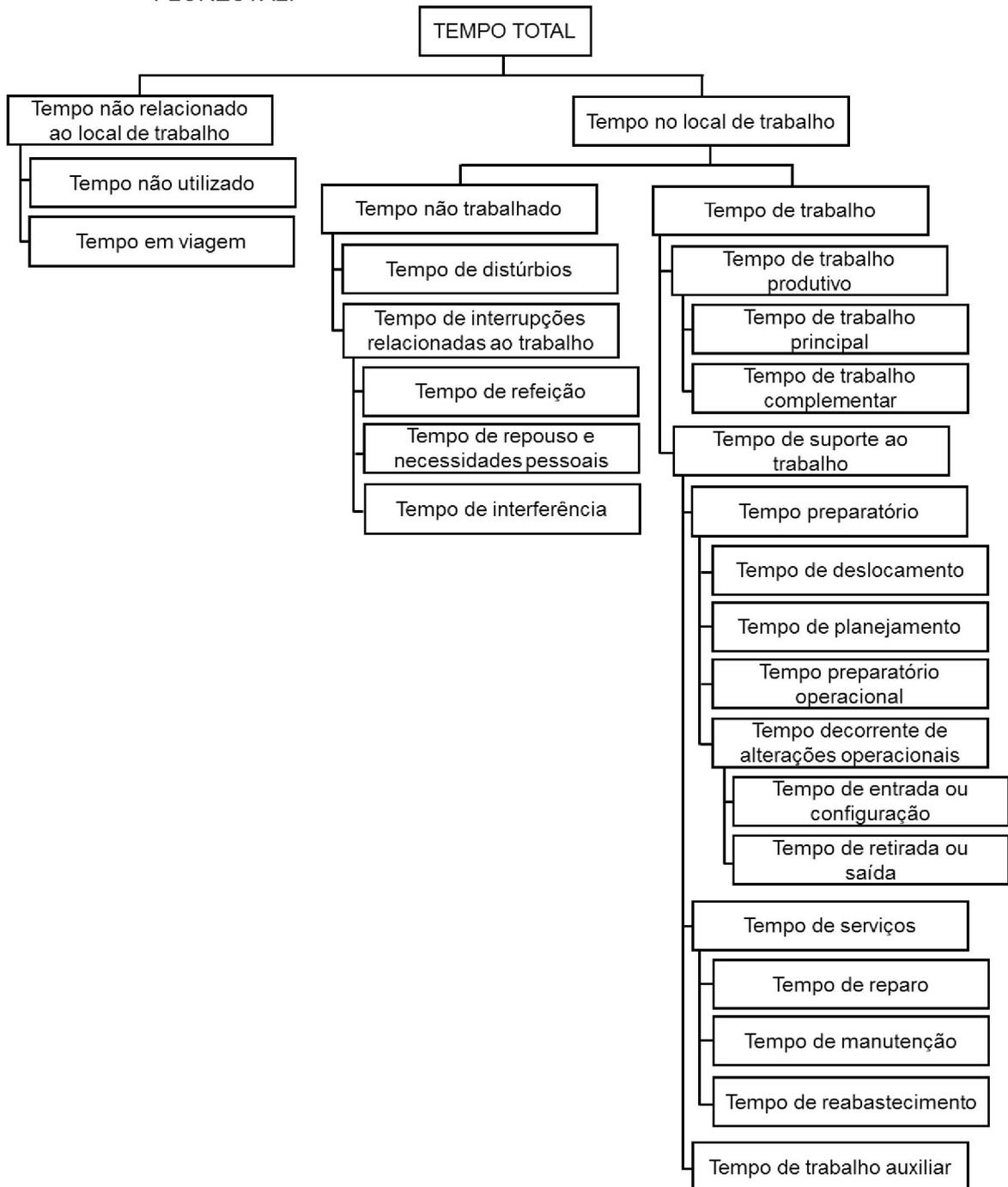
TABELA 3 – COMPARAÇÃO DAS SEIS TÉCNICAS DE ESTUDO DE TEMPO E SEU GRAU TÍPICO DE ESCOPO E DURAÇÃO.

Metodologia	Escopo	Unidade de observação	Duração
Estudo ao nível de turno	Amplio	Turno	Semanas/Meses
Estudo ao nível de parcelas	Amplio	Parcelas	Semanas
Estudo ao nível de ciclo	Médio	Ciclo	Dias
Estudo ao nível de elemento do ciclo	Estreito	Elemento do ciclo	Horas/Dias
Amostragem do trabalho	Estreito	Elemento do ciclo	Horas/Dias
Contagem do tempo e da produção	Estreito	Ciclo(s) ou turno	Horas

FONTE: adaptado de Ackerman et al. (2014).

O consumo de tempo pode ser subdividido ou agrupado de acordo com o papel das etapas/elementos específicos do trabalho em todo o processo. Várias classificações foram elaboradas ao longo do tempo e a maioria das mesmas foi parcialmente harmonizada na publicação da IUFRO intitulada 'Nomenclatura do Estudo do Trabalho Florestal' (FIGURA 3) (MAGAGNOTTI; SPINELLI, 2012).

FIGURA 3 – CLASSIFICAÇÃO DO TEMPO NOS ESTUDOS DE MEDIÇÃO DO TRABALHO FLORESTAL.



FONTE: adaptado de Björheden et al. (1995).

A partir da classificação dos tempos é possível calcular algumas taxas que auxiliam no gerenciamento das operações e cálculos dos custos operacionais. Para a determinação dessas taxas é necessário entender as diferentes unidades horárias passíveis de utilização. Ackerman et al. (2014) menciona as seguintes unidades:

a) Hora-máquina programada ou *schedule machine hour* (SMH): se refere ao tempo do turno de trabalho (por exemplo, 9 horas $\text{turno}^{-1} \text{dia}^{-1}$), ou seja, é uma parte do tempo total que a operação ou parte da operação está envolvida em um trabalho específico.

b) Hora-máquina disponível ou *available machine hour* (AMH): é a parte do tempo em que a máquina está disponível mecanicamente para trabalhar. É dada pelo tempo do turno menos o tempo em manutenção.

c) Hora-máquina produtiva ou *productive machine hour* (PMH): é a porção do tempo de trabalho que é gasto contribuindo diretamente para a conclusão de uma tarefa específica. É dado pelo tempo do turno menos o tempo em manutenção e o tempo em outras interrupções. Alguns autores têm utilizado PMH_0 para se referir a hora-máquina produtiva livre de interrupções (GAFFARIYAN et al., 2012; BRITTO et al., 2017; MAGNAGNOTTI et al., 2017; ROBERT et al., 2017), a qual é sinônimo de hora efetiva de trabalho (he) (MACHADO; MALINOVSKI, 1988). Segundo Spinelli e Visser (2008), na maioria dos países da Europa Central há preferência de incluir interrupções de até 15 minutos no tempo de trabalho produtivo, denominando a unidade horária de PMH_{15} .

As relações entre essas unidades fornecem indicadores que refletem a disponibilidade mecânica e a utilização das máquinas. A disponibilidade mecânica é dada pela razão entre AMH e SMH e refere-se à parte do tempo de trabalho que a máquina está apta mecanicamente para realizar suas funções (BJÖRHEDEN et al., 1995) e está relacionada a manutenção (preventiva ou não) efetuada na máquina (PULKKI, 2001). Por outro lado, a utilização da máquina, também conhecida como taxa de utilização (ACKERMAN et al., 2014; BRINKER et al., 2002) é calculada como a razão entre PMH e SMH, representando a parte do tempo de trabalho em que a máquina está desempenhando a função pretendida (BJÖRHEDEN et al., 1995). A taxa de utilização reflete a disponibilidade mecânica e a eficiência da operação (PULKKI, 2001). No Brasil essa relação é comumente denominada eficiência operacional (OLIVEIRA et al., 2009; LACERDA et al., 2017; DINIZ et al., 2018).

Para a determinação das principais variáveis resposta (produtividade e tempos consumidos), além do registro dos tempos, é necessária a determinação da produção da operação. A produção pode ser mensurada por meio de contagem, volume sólido (m^3), volume empilhado (st), peso verde (kg ou t) e peso seco (kg ou t)

(MAGAGNOTTI; SPINELLI, 2012). No caso de determinações da produção em operações de caráter silvicultural as unidades de medidas adotadas podem ser, por exemplo: número de árvores, metros lineares ou hectares (MACHADO; MALINOVSKI, 1988).

As informações de produtividade (por exemplo, $m^3 \text{ PMH}_0^{-1}$, $m^3 \text{ SMH}^{-1}$ e ha PMH_0^{-1}) são utilizadas para o cálculo do custo de produção das operações. O custo de produção é dado pela razão entre o custo operacional horário e a produtividade (por exemplo, $R\$ m^3$ ou $R\$ \text{ha}^{-1}$) (MINETTE et al., 2008; SIMÕES et al., 2010).

O custo operacional horário é calculado pelo somatório de todos os custos resultantes da aquisição e operação das máquinas e geralmente é expresso na unidade $R\$ \text{PMH}_0^{-1}$ (MACHADO; MALINOVSKI, 1988). Segundo esses mesmos autores, o custo operacional horário pode ser obtido de três maneiras:

- a) Estimativa: são usados valores estimados obtidos com o fabricante ou de experiências anteriores. Nesse caso, a empresa ainda não possui a máquina, por isso, muitas vezes, é denominado 'custo a priori'.
- b) Real: são usados valores reais, pois, nesse caso, a máquina já foi utilizada durante toda sua vida útil econômica. Portanto, todos os parâmetros referentes à máquina são conhecidos, sendo também denominado como 'custo a posteriori'.
- c) Contábil: são usados valores estimados e reais, ou seja, a máquina já foi adquirida, porém alguns parâmetros são desconhecidos em virtude do pouco tempo de uso.

Diversas têm sido as metodologias empregadas na determinação do custo operacional horário em operações florestais. Dentre as mais utilizadas estão: método FAO/ECE/KWF (SILVA et al., 2010; CARMO et al., 2015; SOUZA et al., 2018b), Miyata (1980) (SPINELLI et al., 2004; MAGAGNOTTI et al., 2011; RODRIGUES et al., 2018) e a *American Society of Agricultural Engineers* (ASAE, 2001) (SIMÕES et al., 2010; ROBERT, 2013).

Por fim, destaca-se que o estudo do trabalho florestal é uma importante ferramenta para o gerenciamento das operações florestais e não se limita apenas à medição do tempo e determinação de custos. Ele possui também, ampla aplicação na avaliação de aspectos relacionados à qualidade ambiental e da produção, bem como, à segurança das operações florestais (MAGAGNOTTI; SPINELLI, 2012).

3 CAPÍTULO 1 - DESEMPENHO OPERACIONAL E CUSTOS DE DESBASTE PRÉ-COMERCIAL SEMIMECANIZADO EM *Pinus taeda* L.

3.1 RESUMO

Esse estudo objetivou avaliar e determinar indicadores de desempenho, custos de produção e o percentual de engaiolamento das árvores para quatro prescrições de desbaste pré-comercial em *Pinus taeda*. Os tratamentos estudados foram: desbaste seletivo 'por baixo' com remoção de 250 árv. ha⁻¹ (PC_b) e desbaste seletivo 'pelo alto' com remoção de 250, 375 e 500 árv. ha⁻¹ (PC₂₅₀, PC₃₇₅ e PC₅₀₀, respectivamente). O delineamento experimental de blocos ao acaso foi utilizado, totalizando 12 parcelas amostrais de 700 m² (3 repetições). Previamente à operação, foi realizado inventário florestal nessas parcelas para a caracterização dendrométrica. Estudo de tempos ao nível de elemento do ciclo foi realizado para determinar a produtividade (P_{PMH}) e custos de produção (CP_{pc}) da derrubada das árvores nos tratamentos. PC₂₅₀ apresentou a maior P_{PMH} e menor CP_{pc} (158,01 R\$ ha⁻¹), seguido por PC_b (167,30 R\$ ha⁻¹), PC₃₇₅ (224,56 R\$ ha⁻¹) e PC₅₀₀ (260,72 R\$ ha⁻¹). Os CP_{pc}'s de todos os tratamentos tenderam a aumentar à medida que o diâmetro das árvores derrubadas foi maior. O percentual de engaiolamento das árvores derrubadas também mostrou-se influenciado pelos tratamentos (19%, 25%, 15% e 10% para PC_b, PC₂₅₀, PC₃₇₅ e PC₅₀₀). A P_{PMH}, CP_{pc} e percentual de engaiolamento das árvores sofreram variações, conforme o método de seleção das árvores e intensidade da operação. Esse tipo de desbaste permite a seleção de árvores potenciais de acordo com os critérios de manejo estabelecidos. A execução dessa operação não apresenta problemas consideráveis relacionados ao engaiolamento de árvores e proporciona CP_{pc} atrativos para o atual cenário.

Palavras-chave: Manejo florestal. Operação florestal. Povoamentos jovens. Desbaste 'pelo alto'. Desbaste 'por baixo'.

3.2 ABSTRACT

This study aimed to evaluate and determine performance indicators, production costs and hanged tree percentage for 4 treatments in thin to waste operations in *Pinus taeda*. Treatments studied were: selective thinning 'from below' with removal of 250 tree ha⁻¹

(PC_b) e selective thinning 'from above' with removal of 250, 375 and 500 tree ha⁻¹ (PC₂₅₀, PC₃₇₅ and PC₅₀₀, respectively). The experimental design was randomized blocks, totaling 12 sample plots of 700 m² (3 replicates). Previously to the operation, a forest inventory was carried out in these plots for dendrometric characterization. Elemental time study was conducted to determine the productivity per productive machine hour (P_{PMH}) and production costs (CP_{pc}) of felling trees in treatments. PC₂₅₀ showed the highest productivity per productive machine hour (P_{PMH}) and lower production cost (CP_{pc}) (158.01 R\$ ha⁻¹), followed by PC_b (167.30 R\$ ha⁻¹), PC₃₇₅ (224.56 R\$ ha⁻¹) and PC₅₀₀ (260,72 R\$ ha⁻¹). CP_{pc} of all treatments tended to increase as the diameter of felled trees was larger. The hanged tree percentage was also influenced by treatments (19%, 25%, 15% and 10% for PC_b, PC₂₅₀, PC₃₇₅ and PC₅₀₀). P_{PMH}, CP_{pc} and hanged tree percentage varied according to trees selection method and operation intensity. This thinning type allows the selection of potencial trees according to established management criteria. The operation execution does not present considerable problems related to hanged tree percentage and provides attractive CP_{pc} for the current scenario.

Keywords: Forest management. Forest operation. Young stands. Thinning 'from above'. Thinning 'from below'.

3.3 INTRODUÇÃO

A área brasileira cultivada com o gênero *Pinus* é estimada em 1,6 milhão de hectares: 670 mil ha no Paraná e 540 mil em Santa Catarina, sendo esses, os estados com maior contribuição neste contexto (IBÁ, 2017). O cultivo desse gênero no sul do Brasil é uma atividade consolidada, tanto em empresas verticalizadas, como para pequenos a grandes produtores independentes.

Diferentemente das empresas verticalizadas, produtores independentes utilizam, normalmente, estratégias de manejo florestal que permitem a produção de toras para diferentes segmentos industriais, obtendo, assim, uma diversificação da produção, também conhecida como manejo para múltiplos usos da madeira. Esses usos podem variar desde a utilização para fabricação de celulose e geração de energia (de menor valor de mercado), passando pelo desdobro em serrarias, até a laminação, torneada ou faqueada (maior valor de mercado). Diante desses objetivos de produção, as práticas de manejo florestal têm fundamental importância, pois, estão

altamente relacionadas ao sucesso na obtenção de diferentes produtos e à produtividade dos povoamentos florestais (KOHLENER *et al.*, 2015).

Dentre as práticas de manejo florestal, enquadram-se os desbastes, que são intervenções cujo objetivo principal é regular a competição entre os indivíduos e reestabelecer o crescimento das árvores remanescentes. Entretanto, a seleção dos indivíduos a serem desbastados é um processo complexo e deve ser realizado de forma criteriosa (GOMIDE *et al.*, 2014), devendo ser baseada em parâmetros técnicos e econômicos.

As diversas alternativas técnicas para as intervenções de desbastes podem ser classificadas, primeiramente, conforme a seletividade ou sistematicidade da operação, como desbaste 'seletivo' ou 'sistemático', ou ainda, uma combinação desses (desbaste misto). Subsequentemente, os desbastes são classificados em função dos critérios de seleção das árvores a serem removidas, em seletivo 'por baixo' ou seletivo 'pelo alto' (SMITH *et al.*, 1997). Este último, também conhecido como 'desbaste por copas' na língua inglesa.

No contexto brasileiro e, mais especificamente, no cultivo de *Pinus* spp., desbastes, quando empregados, são realizados quase exclusivamente pelo método seletivo 'por baixo', visando a remoção de indivíduos de qualidade inferior do povoamento (árvores suprimidas ou defeituosas). Esse tipo de desbaste pode ser combinado à desbastes sistemáticos, quando objetiva-se viabilizar o emprego de sistemas mecanizados de colheita florestal, uma vez que é necessário possibilitar o acesso das máquinas.

Além das abordagens citadas anteriormente, Spinelli (2004) classifica os desbastes em 'pré-comercial' e 'comercial', de acordo com os aspectos econômicos que envolvem a execução da operação. No desbaste pré-comercial, conhecido na língua inglesa como '*thin to waste*', como não há o aproveitamento das árvores derrubadas, não há geração de receita a partir dos produtos obtidos do povoamento, o que não proporciona subsídios aos custos dessas operações. Por isso, este tipo de intervenção tem o propósito de somente atender aos aspectos de manejo dos povoamentos, visando exclusivamente os benefícios futuros de estímulo do crescimento das árvores remanescentes em função da redução de competição.

No caso dos desbastes comerciais, embora tenham potencial de gerar receita e lucro, apresentam diversos desafios, como: baixa produtividade, elevados custos de produção, baixo valor dos produtos colhidos e potencial de danos às árvores

remanescentes (OIKARI *et al.*, 2010). Sobretudo nas intervenções de primeiro desbaste, as condições operacionais tendem a ser ainda mais restritivas do que intervenções de desbastes posteriores (SPINELLI, 2004).

Dessa forma, o desbaste pré-comercial é uma alternativa interessante, que permite postergar o primeiro desbaste comercial sem prejuízo ao crescimento das árvores que compõem o povoamento. Embora pouco difundido, esse tipo de desbaste vem sendo executado em plantios de *Pinus* no Sul do país, Nordeste argentino e outros países vizinhos (PEZZUTTI *et al.*, 2016), justamente em função do resultado econômico negativo de um primeiro desbaste comercial aplicado em povoamentos mais jovens, decorrente de altos custos operacionais e baixo valor da madeira.

Diante do exposto, esse estudo foi conduzido tendo como premissa, a hipótese de que a realização de um desbaste pré-comercial em povoamentos de *Pinus taeda* L. aos 5 anos de idade permite, de acordo com as prescrições de manejo, a seleção confiável de árvores potenciais a serem liberadas de competição (desbaste seletivo pelo alto), ao mesmo tempo que possibilita a execução da operação sem problemas operacionais (engaiolamento), com custo atrativo e variando conforme o método de seleção das árvores e intensidade da operação.

Portanto, o presente estudo teve como objetivo avaliar e determinar indicadores de desempenho operacional, custos de produção e percentual de engaiolamento das árvores nas operações de desbaste pré-comercial em *Pinus taeda*, os quais são pré-requisitos para o sucesso do planejamento e implementação dessas operações.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1 Área de estudo e delineamento experimental

O estudo foi realizado em um povoamento de *Pinus taeda* estabelecido no inverno de 2012 com espaçamento de 2,5 m x 2,5 m (1.600 árv. ha⁻¹), localizado no município de Campo Belo do Sul, SC (SIRGAS2000 UTM 22J 518.075 m E e 6.903.287 m S), 980 m acima do nível do mar. Segundo a classificação de Köppen, a região apresenta clima mesotérmico úmido, sem estação seca definida, verões frescos, com ocorrência de geadas severas e frequentes no inverno (Cfb). A precipitação e temperatura média anual são de 1.800 mm e 16,5 °C, respectivamente

(ALVARES *et al.*, 2014). O relevo do local onde o estudo foi conduzido era predominantemente plano, o que limita os resultados do presente estudo para tal condição.

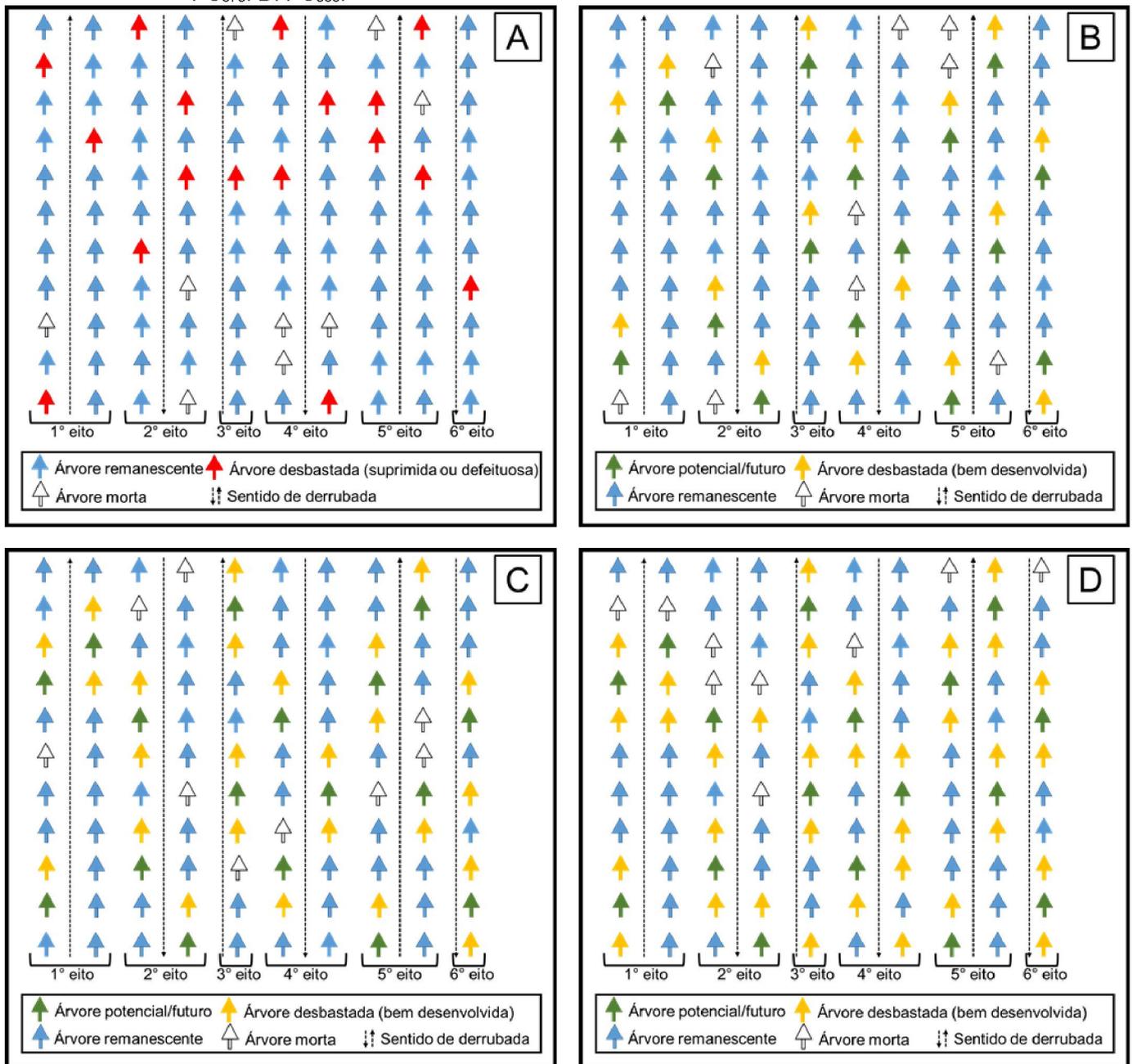
Tratos culturais como o controle de formigas cortadeiras e da mato-competição foram realizados sempre que necessário. No momento da realização do presente estudo as árvores possuíam 5 anos de idade e uma altura de poda de 3,5 m (após 3 intervenções). A 5ª linha de plantio não foi podada em função de ser planejada a sua remoção de forma sistemática no primeiro desbaste comercial.

O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso com 3 repetições e 4 tratamentos, caracterizados pelo tipo e intensidade do desbaste pré-comercial. As parcelas experimentais eram compostas de 10 linhas de plantio (700 m² de área útil) (FIGURA 4, p. 53). Os tratamentos estudados foram: **PC_b**: desbaste pré-comercial seletivo 'por baixo' com a retirada de 250 árv. ha⁻¹; **PC₂₅₀**: desbaste pré-comercial 'pelo alto', com a seleção de 250 árvores potenciais ha⁻¹ e remoção de 1 concorrente por árvore potencial (remoção de 250 árv. ha⁻¹); **PC₃₇₅**: desbaste pré-comercial 'pelo alto', com seleção de 250 árvores potenciais ha⁻¹ e remoção de 1,5 concorrente por árvore potencial (remoção de 375 árv. ha⁻¹); e **PC₅₀₀**: desbaste pré-comercial 'pelo alto', com a seleção de 250 árvores potenciais ha⁻¹ e remoção de 2 concorrentes por árvore potencial (remoção de 500 árv. ha⁻¹).

Com exceção do desbaste 'por baixo' (PC_b), em todos os demais foram selecionadas árvores potenciais/futuro (dominantes) distantes 6-7 m umas das outras (250 árv. ha⁻¹) e, na sequência, selecionada(s) a(s) principal(ais) concorrentes para remoção. No tratamento PC₃₇₅, onde 1,5 indivíduos foram removidos por árvore potencial, significou remover ora 1, ora 2 concorrentes, dependendo da severidade da competição sobre a árvore potencial.

O eito de trabalho consistia em 2 linhas de plantio, exceto a 5ª linha (não podada), trabalhada individualmente (FIGURA 4). O trabalho foi realizado por um motosserrista (sistema 1 + 0). As árvores desbastadas não foram desganhadas e aproveitadas comercialmente. Para a derrubada foi utilizada motosserra STIHL, modelo MS381, com motor dois tempos, potência de 3,9 kW (5,3 cv), 72,2 cilindradas, peso de 6,6 kg e sabre de aproximadamente 40 cm (corrente de 30 dentes). Árvores de maior tamanho eram derrubadas com a realização do entalhe direcional e corte de derrubada (3 cortes), ao passo que para árvores finas, somente um corte era efetuado e o operador direcionava a árvore com o ombro.

FIGURA 4 – DESENHO ESQUEMÁTICO DOS TRATAMENTOS ESTUDADOS. A: PC_b. B: PC₂₅₀. C: PC₃₇₅. D: PC₅₀₀.



FONTE: O autor (2019).

Legenda: Árvores potenciais/futuro permanecerão até o corte final do povoamento, a não ser que sejam danificadas em alguma operação de desbaste comercial.

3.4.2 Dados coletados

3.4.2.1 Inventário florestal

Na primavera de 2017, quando o povoamento estava prestes a completar 5 anos, realizou-se inventário florestal em todas as unidades amostrais estabelecidas. Foram medidos todos os diâmetros à altura do peito (dap, cm) com fita diamétrica e a

altura total (h, m) de todos os indivíduos da primeira linha de plantio e das árvores dominantes com hipsômetro Vertex™. Um total de 1.753 diâmetros e 146 alturas foram coletadas.

3.4.2.2 Operação de desbaste pré-comercial

A operação foi estudada por meio de estudo de tempos ao nível de elementos do ciclo seguindo a abordagem de estudo experimental e de modelagem, conforme proposto por Magagnotti e Spinelli (2012) e Ackerman *et al.* (2014). O ciclo operacional de trabalho foi dividido em dois elementos: deslocamento entre árvores (DEA), derrubada da árvore (DR). Adicionalmente o tempo em interrupções da operação também foi aferido.

Além do registro dos tempos do ciclo para derrubada de cada árvore individualmente, foi também registrado o respectivo dap, baseado nas informações do inventário prévio ao desbaste, disponível na forma de croqui por unidade amostral. A técnica de cronometragem empregada foi a de tempo individual, com o uso do *software Time Motion Study* versão 2.3 em *tablet* e formulários específicos para identificação dos ciclos de trabalho e co-variáveis. Adicionalmente, foram coletadas as frequências de engaiolamento das árvores derrubadas, servindo como indicador comparativo da qualidade das operações.

3.4.3 Análise dos dados

3.4.3.1 Inventário florestal

O processamento dos dados do inventário foi realizado com auxílio do software Florexel®. As características dendrométricas analisadas foram: diâmetro médio quadrático (d_g , cm), altura total (h, m), volume médio individual (v_i , m³), número de árvores por hectare (N, árv ha⁻¹), área basal por hectare (G, m² ha⁻¹) e volume por hectare (V, m³ ha⁻¹). Essas variáveis foram quantificadas para as condições prévias e posteriores à realização do desbaste pré-comercial. Assim, foi possível quantificar a intensidade dos tratamentos por meio de diferentes indicadores (N, G e V).

Foram testados diversos modelos matemáticos para o ajuste de uma equação hipsométrica por tratamento, tendo sido selecionado aquele com melhor ajuste,

definido em função do maior coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), menor erro padrão da estimativa percentual ($S_{yx}\%$) e análise dos resíduos (ajuste e equações não apresentadas).

Para estimar o volume dos indivíduos a partir de variáveis conhecidas (dap e h), foi utilizada a equação ajustada para árvores jovens de *P. taeda* por Novack Jr. (2018) em condições semelhantes a estudada.

Previamente à análise de variância dos dados, foram testados os pressupostos de igualdade das variâncias (Bartlett), independência (Durbin-Watson) e normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk). Após confirmado o atendimento a todos estes pressupostos, procedeu-se a análise de variância (Anova) dos dados. A Anova teve o intuito de verificar se as unidades amostrais apresentavam diferenças quanto às características dendrométricas antes da realização do desbaste. Estas análises foram realizadas com o auxílio do programa R (R Core Team, 2016).

3.4.3.2 Desempenho e custos das operações de desbaste pré-comercial

As variáveis operacionais estudadas foram: tempos consumidos nos elementos do ciclo operacional (DEA e DR), tempo total do ciclo de trabalho (TT), interrupções, produtividade por hora-máquina produtiva (P_{PMH}), custos de produção (CP_{pc}) e percentual de engaiolamento (E%).

As interrupções foram classificadas de acordo com a nomenclatura sugerida pela IUFRO (BJÖRHEDEN *et al.*, 1995). A P_{PMH} (árv. PMH_0^{-1} e $ha\ PMH_0^{-1}$) foi determinada conforme Magnagnotti *et al.* (2017), onde uma hora-máquina produtiva ou *productive machine hour* (PMH_0) é aquela em que não são consideradas interrupções, ou seja, uma hora de trabalho efetivo.

Os custos operacionais horários (COH) e CP_{pc} foram calculados conforme Miyata (1980) (TABELA 4), considerando uma taxa de administração de 30% (fornecida pela empresa). Os custos com combustível, óleo 2 tempos e manutenção não foram determinados separadamente para os tratamentos. A proporção de óleo 2 tempos em relação ao combustível foi 1:40. Os custos referentes aos equipamentos de proteção individual foram inclusos nos custos com pessoal operacional.

O COH foi calculado para uma utilização estimada de 1.162 horas anuais (TU = 50%) e vida útil de 1 ano para a motosserra. O custo com a licença bianual de operação considerada foi de R\$ 80,00. Os custos de combustível e óleo lubrificante

2T foram de 3,95 R\$ L⁻¹ e 34,78 R\$ L⁻¹, respectivamente. O rendimento médio da operação em relação ao consumo de combustível foi de 110 árvores derrubadas por litro de combustível. O período de depreciação considerado para a corrente, pinhão e sabre foi de 150 PMH₀, 300 PMH₀ e 600 PMH₀, respectivamente.

Embora as intensidades de desbaste efetivamente realizadas a campo não tenham sido idênticas àsquelas teóricas consideradas nas prescrições dos tratamentos, devido à mortalidade e problemas no espaçamento inicial do povoamento. O cálculo da P_{PMH} e CP_{pc} dos tratamentos foi realizado sob a consideração da intensidade teórica de desbaste, visto que ambos os resultados são dependentes do número de árvores derrubadas por unidade de área.

TABELA 4 – EXPRESSÕES UTILIZADAS PARA OS CÁLCULOS DOS CUSTOS OPERACIONAIS HORÁRIOS (COH) PARA DESBASTE PRÉ-COMERCIAL EM POVOAMENTOS DE *Pinus taeda*.

Item de custo	Expressão
Depreciação	$DP = \frac{Va}{N * PMH}$
Pessoal operacional	$PO = \frac{[(S + (S * Es)) * 12]}{PMH}$
Combustível	$Cco = C * Pu$
Óleo lubrificante	$Col = Co * Pu$
Manutenção	$Man = \frac{(C_{corrente} + C_{sabre} + C_{pinhão})}{N * PMH}$
Custo direto	$CD = DP + PO + Cc + Col + Man$
Administração	$CAD = CD * TA$
Custo operacional horário	$COH = CD + CAD$

FONTE: O autor (2019).

Legenda: DP: depreciação (R\$ PMH₀⁻¹); Va: valor de aquisição (R\$); N: vida útil (anos); PMH₀: horas-máquina produtivas anuais; PO: custo com pessoal operacional (R\$ PMH₀⁻¹); S: salário base do operador (R\$); Es: encargos sociais (%); Cco: custo com combustível (R\$ PMH₀⁻¹); Co: consumo de óleo lubrificante (L PMH₀⁻¹); Pu: preço unitário (R\$ L⁻¹); Col: custo com óleo lubrificante 2 tempos (R\$ PMH₀⁻¹); C: consumo de combustível (L PMH₀⁻¹); Man: custo com manutenção (R\$ PMH₀⁻¹); C_{corrente}: custo com corrente (R\$); C_{sabre}: custo com sabre (R\$); C_{pinhão}: custo com pinhão (R\$); CD: custo direto (R\$ PMH₀⁻¹); CAD: custos administrativos (R\$ PMH₀⁻¹); TA: taxa de administração; COH: custo operacional horário (R\$ PMH₀⁻¹).

Os erros de amostragem relativos (ER) do estudo de tempos e movimentos foram determinados para o nível de 95% de probabilidade de acerto, conforme Murphy

(2005). As variáveis DEA, DR, TT, P_{PMH} e dap foram analisadas por meio de estatística descritiva. A variável dependente (DR) usada na modelagem estatística foi submetida aos testes de Bartlett e Shapiro-Wilk (W). Posteriormente, modelagem linear generalizada foi aplicada com o objetivo de explorar em detalhes a contribuição dos diferentes tratamentos testados (efeito fixo) e do dap das árvores (efeito aleatório) na variação dos indicadores operacionais estudados (DEA, DR, TT, P_{PMH} e CP_{pc}), conforme Ampoorter *et al.* (2010).

A comparação do desempenho operacional dos tratamentos estudados foi realizada por meio de modelagem estatística. Dessa forma, os efeitos do fator quantitativo (dap) associados aos tempos dos elementos do ciclo foram testados por meio de regressão linear para cada tratamento, em caso de significância desse fator na modelagem linear generalizada.

Como os dados de DR não apresentaram normalidade, os mesmos foram submetidos à transformação logarítmica, para, então, serem modelados. Para as equações geradas, os valores estimados foram obtidos pelo antilogaritmo natural, seguido da aplicação do Fator de Correção de Meyer (F.M.) (Expressão 1) (SANQUETTA *et al.*, 2015). As estimativas foram avaliadas por meio do coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) e erro padrão da estimativa ($S_{yx}\%$) ou da média (SE).

$$F.M. = e^{0,5*QMRes} \quad (\text{Expressão 1})$$

Em que: $e = 2,718281828$; $QMRes$ = quadrado médio do resíduo.

Para análise de tendência do CP_{pc} em função do dap , foi considerada uma taxa de utilização (TU) de 50%, uma vez que, geralmente, as interrupções em operações semimecanizadas são elevadas devido a dependência de condições climáticas favoráveis para trabalho, além de pausas por motivos ergonômicos.

Por fim, realizou-se análise de sensibilidade do CP_{pc} em função de variações da TU (30 a 80%) e taxas administrativas (0% a 30%) com o propósito de simular as possíveis flutuações dos mesmos. Adicionalmente, foram analisados de forma descritiva os valores percentuais de engaiolamento.

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1 Caracterização do povoamento

O povoamento selecionado para a instalação do experimento apresentava densidade inicial inferior a 1.600 árv.ha⁻¹ (TABELA 5), indicando mortalidade (8%) e inconsistência no espaçamento de plantio (7%).

Em função de divergências entre a densidade de árvores teórica e real antes da realização do desbaste pré-comercial, pequenos ajustes na implementação dos tratamentos foram necessários. Por exemplo, nas parcelas do desbaste pré-comercial por baixo (PC_b), o planejado inicialmente, era remover a pior árvore a cada 4 árvores (25%, ou 400 árv. ha⁻¹) e, apesar do número de árvores removidas ter totalizado apenas 220 árv. ha⁻¹ (15% em relação à densidade real), o número de árvores após a realização do desbaste pré-comercial (1.230 árv. ha⁻¹) indica uma redução de 370 árv. ha⁻¹, 23% em relação à densidade teórica de 1.600 árv. ha⁻¹.

TABELA 5 - CARACTERIZAÇÃO DENDROMÉTRICA DOS POVOAMENTOS DE *Pinus taeda* ANTES E DEPOIS DO DESBASTE PRÉ-COMERCIAL.

Variável	unidade	PC _b			PC ₂₅₀			PC ₃₇₅			PC ₅₀₀		
		antes	depois	Δ	antes	depois	Δ	antes	depois	Δ	antes	depois	Δ
d _g	cm	14,1	14,5		15,3	15,1		15,3	15,2		14,1	14,1	
h	m	8,2	8,4		9,1	9,1		9,3	9,2		8,2	8,0	
v _i	m ³	0,016	0,019		0,024	0,024		0,026	0,026		0,017	0,016	
N	árv ha ⁻¹	1.450	1.230	220	1.400	1.120	280	1.330	950	380	1.350	890	460
G	m ² ha ⁻¹	23,0	20,6	2,4	25,7	20,2	5,5	24,8	17,3	7,5	21,3	13,8	7,5
V	m ³ ha ⁻¹	30,7	30,3	0,4	41,8	33,3	8,5	43,1	29,9	13,2	29,3	18,4	10,9

FUNTE: O autor (2019).

Legenda: d_g: diâmetro quadrático médio; h: altura total média; v_i: volume médio individual; N: número de árvores por hectare; G: área basal por hectare; V: volume total com casca por hectare; Δ: variação.

De forma semelhante, após selecionar uma árvore potencial e iniciar a procura pela principal concorrente a ser removida no PC₂₅₀, caso houvesse uma falha e nenhuma outra competidora intensa, nenhuma árvore foi removida. Procedeu-se de forma semelhante nos demais e, assim, diferenças prévias do povoamento foram corrigidas e consideradas na marcação do desbaste de forma a estabelecer condições de crescimento coerentes com o delineamento experimental e distintas entre si para permitir a continuidade do estudo em relação à resposta em crescimento das árvores.

As características dendrométricas das unidades amostrais antes da implantação do experimento (TABELA 5) foram comparadas. Após confirmados os pressupostos da análise de variância (Bartlett: $p = 0,47$, $p = 0,82$, $p = 0,73$; Durbin-Watson: $p = 0,83$, $p = 0,87$, $p = 0,65$; e Shapiro-Wilk: $p = 0,80$, $p = 0,69$, $p = 0,82$; para N, G e V, respectivamente) concluiu-se não haver diferenças significativas para nenhuma característica avaliada ($p = 0,57$, $p = 0,72$, $p = 0,10$, para N, G e V, respectivamente). Desta forma, permitindo maior confiabilidade das análises que seguem.

Chama-se atenção aos valores destacados em negrito na TABELA 5 (N e G), pois são estes que caracterizam a condição do povoamento depois do desbaste. Em resumo, considerando as diferenças entre as unidades amostrais, partindo de um povoamento com 5 anos de idade (1.400 árv. ha⁻¹ e 24 m² ha⁻¹), os tratamentos significaram uma redução de:

- 220 árv. ha⁻¹ (15%), 280 árv. ha⁻¹ (20%), 380 árv. ha⁻¹ (29%) e 460 árv. ha⁻¹ (34%), para os tratamentos PC_b, PC₂₅₀, PC₃₇₅ e PC₅₀₀, respectivamente.

- 2,4 m² ha⁻¹ (10%), 5,5 m² ha⁻¹ (21%), 7,5 m² ha⁻¹ (30%) e 7,5 m² ha⁻¹ (35%), para os tratamentos PC_b, PC₂₅₀, PC₃₇₅ e PC₅₀₀, respectivamente.

Constata-se que, no desbaste 'por baixo' (PC_b), a redução em área basal é proporcionalmente inferior àquela em número de árvores. Resultado este esperado e coerente, visto que somente indivíduos suprimidos e defeituosos são removidos. Nos demais, todos 'pelo alto', a redução em área basal e número de árvores é proporcional. Comprova-se assim, que árvores no mínimo médias foram selecionadas como concorrentes às potenciais e, na sequência, removidas, caracterizando, dessa forma, um desbaste seletivo 'pelo alto' típico.

A área basal depois do desbaste é semelhante nos tratamentos PC_b e PC₂₅₀, entretanto, há uma diferença fundamental. A liberação de espaço adicional para o crescimento das árvores remanescentes ocorreu somente no PC₂₅₀, enquanto que no PC_b, pouco ou nada mudou para as árvores remanescentes.

3.5.2 Desempenho operacional do desbaste pré-comercial

Foram amostrados 369 ciclos de trabalho (290 com coletas do dap), dos quais foram obtidos erros relativos de amostragem de 5,3% e 5,8%, para as variáveis P_{PMH} e TT, respectivamente. Os elementos DEA e DR representaram, respectivamente,

32% e 35% do ciclo de trabalho, ao passo que as interrupções ocuparam cerca de 33% do tempo programado de operação, o que ocasionou TU de 68% no período estudado.

A maioria das interrupções foram relacionados ao repouso e necessidades do operador (31%), seguida por trabalhos auxiliares decorrentes do engaiolamento de árvores (22%), reabastecimento (21%) e reparos relacionados a limpeza do filtro de ar e sistema de lubrificação da corrente (14%). Outras interrupções representadas por deslocamentos até a floresta (2%), presença de animais peçonhentos (2%) e perdas de tempo adicionais nas refeições (7%) foram observadas.

Entretanto, a TU encontrada no estudo pode não refletir a real proporção do uso do tempo na operação, por se tratar de um estudo de curto prazo. Magagnotti e Spinelli (2012) recomendam que para a determinação precisa dessa variável sejam realizados estudos de longo prazo, assim como, para estimativas de interrupções.

As principais interrupções foram decorrentes do repouso e necessidades do operador. Segundo Souza *et al.* (2015), a legislação brasileira sobre segurança do trabalho fornece limites e regime de pausas para descanso conforme a carga de trabalho físico e exposição do trabalhador ao calor, os quais devem ser observados de acordo com a particularidade da operação.

Interrupções decorrentes de trabalhos auxiliares relacionados ao engaiolamento das árvores derrubadas, também, se mostraram importantes, fato esperado devido ao recente início da prática de desbaste pré-comercial na empresa, o que exige um período de adaptação e treinamento dos operadores (LINHARES *et al.*, 2012), bem como, um melhor planejamento e controle das operações (LOPES *et al.*, 2016).

Nenhuma das variáveis estudadas apresentou normalidade, ao passo que todas, exceto o dap, mostraram coeficientes de variação elevados (40,9% a 101,6%), o que evidencia grandes amplitudes entre valores máximos e mínimos (TABELA 6), decorrentes da elevada variabilidade dos tempos consumidos na operação.

TABELA 6 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA DAS VARIÁVEIS OPERACIONAIS DO DESBASTE PRÉ-COMERCIAL EM *Pinus taeda*.

Variável	n	Média	Mediana	σ	CV (%)	Mín.	Máx.	Ampl.	Curt.	Assim.	W
DEA (s)	369	22,68	14,67	23,05	101,63	1,31	159,91	158,60	9,36	2,79	0,70**
DR (s)	369	24,45	22,27	9,99	40,86	3,45	66,73	63,28	2,46	1,25	0,92**
TT (s)	369	47,13	38,92	26,66	56,56	10,49	188,30	177,80	5,70	2,19	0,80**
P _{PMH} (ár.v.PMH ₀ ⁻¹)	369	94,12	92,50	38,90	41,33	19,12	343,05	323,93	4,39	1,00	0,95**
P _{PMH} (ha PMH ₀ ⁻¹)	369	0,27	0,24	0,14	51,25	0,04	1,37	1,33	12,50	2,28	0,92**
dap (cm)	290	14,45	14,70	2,53	17,48	5,40	20,20	14,80	0,72	-0,56	0,97**

FONTE: O autor (2019).

Legenda: n = número de amostras; σ : desvio padrão; CV = coeficiente de variação; Mín. = mínimo; Máx. = máximo; Curt. = curtose; Assim. = assimetria; W = valor do teste de Shapiro-Wilk; **valores significativos ao nível de 1% de probabilidade.

Os elementos do ciclo DEA e DR apresentaram coeficientes de variação muito altos, de acordo com Gomes (1990). Tal variação é justificada devido ao DEA ter sido influenciado pelos tratamentos testados, com dependência do método de seleção empregado ('por baixo' e 'pelo alto') (TABELA 7).

TABELA 7 - MODELOS DE TEMPOS CONSUMIDOS SIGNIFICATIVOS ($p < 0,01$) PARA OS DIFERENTES TRATAMENTOS, NA OPERAÇÃO DE DESBASTE PRÉ-COMERCIAL DE POVOAMENTOS DE *Pinus taeda*.

Tratamentos	Equação de regressão	n	R ² _{aj.}	S _{yx} (s)	S _{yx} %	SE (s)	F.M.
PC_b							
DEA (s)	31,20	46	-	-	-	3,6	-
DR (s)	$\ln(\text{DR}) = 1,4995 + 0,1267*(\text{dap})$	46	0,46	7,7	35,4	-	1,0781
PC₂₅₀							
DEA (s)	23,41	58	-	-	-	2,7	-
DR (s)	$\ln(\text{DR}) = 1,8557 + 0,0813*(\text{dap})$	58	0,20	8,8	36,2	-	1,0535
PC₃₇₅							
DEA (s)	19,31	78	-	-	-	2,1	-
DR (s)	$\ln(\text{DR}) = 1,8905 + 0,0797*(\text{dap})$	78	0,19	6,9	28,5	-	1,0436
PC₅₀₀							
DEA (s)	15,99	99	-	-	-	1,7	-
DR (s)	$\ln(\text{DR}) = 1,8172 + 0,0872*(\text{dap})$	99	0,27	6,5	28,9	-	1,0395

FONTE: O autor (2019).

Legenda: n = número de amostras; R²_{aj.} = coeficiente de determinação ajustado; S_{yx} = erro padrão da estimativa absoluto; S_{yx}% = erro padrão da estimativa relativo; SE = erro padrão da média; F.M. = fator de correção de Meyer.

Nos tratamentos em que o desbaste 'pelo alto' foi aplicado, os valores para DEA foram menores quando comparados ao tratamento com desbaste 'por baixo'. Esse comportamento está associado ao menor número de árvores derrubadas em PC_b (220 árv. ha⁻¹), o que despendeu maior tempo de procura da árvore a ser

derrubada, e também, à operação acontecer com maior sistematicidade quando se empregou o método de seleção 'pelo alto'.

Entretanto, quando considerados isoladamente, os tratamentos neste método de seleção, notou-se que os tempos em DEA diminuíram a medida que o número de árvores a serem derrubadas aumentava. Leite *et al.* (2014) ao estudar o corte semimecanizado de eucalipto em regime de corte raso, inferiram resultados diferentes aos do presente estudo, com maiores consumos de tempo para deslocamento entre árvores em maiores densidades de povoamento. Esse contraste de resultados pode ser associado à diferença de dinâmica e sistemática de trabalho entre operações de corte raso e desbaste.

A modelagem linear generalizada demonstrou que as variáveis DEA, DR, TT, P_{PMH} e CP_{pc} foram influenciadas significativamente pelos diferentes tratamentos ($p < 0,05$), ao passo que as mesmas variáveis, exceto o DEA ($p = 0,40$), mostraram-se complementarmente influenciadas pelo dap das árvores derrubadas ($p < 0,05$) (TABELA 8). Dessa forma, a modelagem do desempenho operacional foi realizada individualmente para cada tratamento (TABELA 7), porém, modelando-se apenas o elemento DR em função do dap, pois, conforme reportado, DEA não apresentou relação com essa variável.

TABELA 8 - RESULTADOS DA MODELAGEM LINEAR GENERALIZADA PARA A INFLUÊNCIA DOS BLOCOS, TRATAMENTOS E DAP'S NAS VARIÁVEIS OPERACIONAIS ESTUDADAS.

Fonte de variação	GL	Variáveis operacionais				
		DEA (s)	DR (s)	TT (s)	P_{PMH} (ha PMH_0^{-1})	CP_{pc} (R\$ ha^{-1})
Bloco	2	0,60	0,48	0,92	0,16	0,53
Tratamento	3	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01
Dap	289	0,40	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

FONTE: O autor (2019).

Legenda: Valores em negrito são significativos ao nível de 5% de probabilidade.

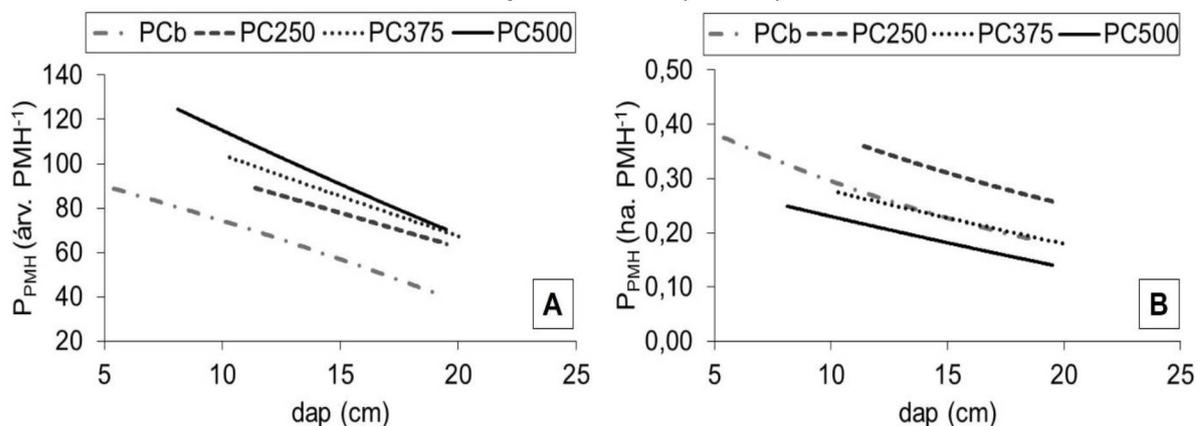
O tempo de DR foi influenciado pelo dap das árvores, o que se refletiu adicionalmente, em diferenças entre os tratamentos estudados. A prescrição PC_b apresentou o menor valor para esse elemento do ciclo, como reflexo do menor dap médio (11,5 cm) das árvores desbastadas em relação aos demais tratamentos (dap médio = 15,6 cm; 15,5 cm e 14,2 cm para PC_{250} , PC_{375} e PC_{500} , respectivamente), pois, nessa prescrição, as árvores derrubadas foram as suprimidas, dominadas e defeituosas. Leite *et al.* (2014), corroboram os resultados do presente estudo ao inferir

que houve aumento do tempo consumido na derrubada, à medida que os diâmetros das árvores foram maiores.

Em todos os tratamentos estudados, a P_{PMH} mostrou tendência de diminuição com o aumento do dap (FIGURA 5A e 5B). A derrubada de árvores de pequeno porte muitas vezes não exigiu a realização do entalhe direcional, ao passo que para as árvores de maior porte, esse procedimento era realizado como medida de segurança para o direcionamento da árvore, o que onerava um maior tempo, e por consequência, levou a diminuição da P_{PMH} . Entretanto, mesmo que haja impacto nos tempos consumidos, a produtividade exigida dos trabalhadores sempre deve estar associada às questões de segurança no trabalho (PEREIRA *et al.*, 2012).

Considerando P_{PMH} (árv. PMH_0^{-1}), o tratamento menos produtivo foi PC_b , ao passo que, os mais produtivos foram PC_{500} , PC_{375} e PC_{250} , respectivamente (FIGURA 5A). Entretanto, quando avaliada a P_{PMH} ($ha\ PMH_0^{-1}$) (FIGURA 5B), houveram mudanças no ordenamento dos tratamentos, com PC_{250} sendo o mais produtivo, enquanto, PC_{500} foi o menos produtivo. Portanto, apesar de PC_{500} ser mais produtivo em número de árvores produzidas por PMH_0 em relação à PC_{250} , a diferença entre o número de árvores desbastadas ($500\ árv.\ ha^{-1}$ e $250\ árv.\ ha^{-1}$, respectivamente) entre esses tratamentos, torna PC_{250} mais produtivo quando comparado a PC_{500} , considerando a área produzida por PMH_0 .

FIGURA 5 - VARIÇÃO DA P_{PMH} (árv. PMH_0^{-1}) (A) E ($ha\ PMH_0^{-1}$) (B) DA OPERAÇÃO DE DESBASTE PRÉ-COMERCIAL EM FUNÇÃO DO DAP ($n = 290$).



FONTE: O autor (2019).

Os tratamentos PC_{250} e PC_b apresentaram diferenças evidentes em suas P_{PMH} ($ha\ PMH_0^{-1}$) (FIGURA 5B), ainda que, considerada a mesma densidade de desbaste nos cálculos de produtividade ($250\ árv.\ ha^{-1}$). Essas diferenças se devem a um

dispêndio de tempo 33% superior no DEA, de PC_b em relação a PC_{250} (TABELA 7), devido a maior dificuldade de encontrar as árvores para derrubada no tratamento em que o desbaste ‘por baixo’ foi utilizado, bem como, às diferenças do número de árvores efetivamente desbastadas no experimento em ambos os tratamentos ($PC_b = 220$ árv. ha^{-1} ; $PC_{250} = 280$ árv. ha^{-1}).

Quando o desbaste ‘pelo alto’ foi aplicado (PC_{250} , PC_{375} e PC_{500}), a localização das árvores era facilitada, pois, as mesmas estavam distribuídas de forma mais uniforme na área. Para esses tratamentos, de maneira geral, houve diminuição da P_{PMH} (ha PMH_0^{-1}), à medida que o dap das árvores derrubadas e a intensidade de desbaste foram maiores.

3.5.3 Custos e qualidade da operação de desbaste pré-comercial

O COH foi de 44,89 R\$ PMH_0^{-1} , sendo resultante, principalmente, do pessoal operacional (62%), seguido pelos custos administrativos (23%), combustível (6%) e depreciação (5%) (TABELA 9).

TABELA 9 - CUSTOS OPERACIONAIS HORÁRIOS (COH) DO DESBASTE PRÉ-COMERCIAL EM *Pinus taeda*.

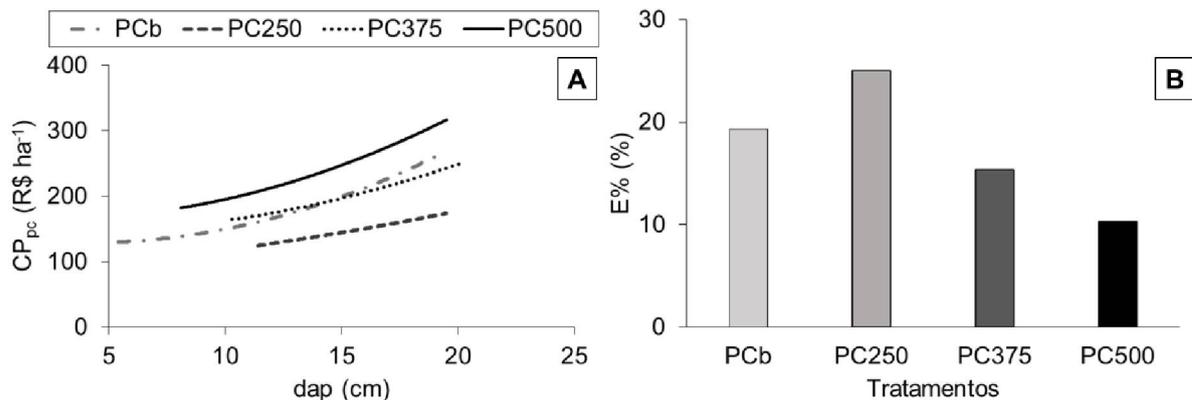
Categoria de custo		(R\$ PMH_0^{-1})	%
	Depreciação	2,31	5,1
Custos fixos	Pessoal operacional	27,95	62,3
	Licença de operação	0,03	0,1
Custos variáveis	Combustível	2,80	6,2
	Óleo lubrificante 2T	0,63	1,4
	Manutenção	0,81	1,8
Custo direto		34,53	76,9
Custos administrativos		10,36	23,1
Custo operacional horário		44,89	100

FONTE: O autor (2019).

Os custos com pessoal operacional e combustível foram os mais representativos no COH. Esse comportamento foi reforçado pelo estudo de Leite *et al.* (2014), que obtiveram maior representatividade nos custos de mão-de-obra (75%) e combustível (13%). O COH encontrado por esses autores foi de 24,20 R\$ PMH_0^{-1} , valor menor ao encontrado no presente estudo (44,89 R\$ PMH_0^{-1}), explicado, dentre outros motivos, pela adoção de uma maior TU (90%) frente a utilizada no presente estudo (50%).

O tratamento PC₅₀₀ apresentou o maior CP_{pc} médio (260,72 R\$ ha⁻¹), seguido por PC₃₇₅ e PC_b (224,56 R\$ ha⁻¹ e 167,30 R\$ ha⁻¹, respectivamente), que apresentaram custos intermediários (FIGURA 6A). O menor CP_{pc} foi obtido em PC₂₅₀ (158,01 R\$ ha⁻¹), decorrente da maior P_{PMH} (ha PMH^{o-1}) em relação aos demais tratamentos (FIGURA 5B, p. 63). Em todos os tratamentos, o CP_{pc} apresentou tendência de aumento à medida que o dap das árvores derrubadas foi maior (FIGURA 6A). Isso sugere que a antecipação dessas operações poderia refletir na diminuição do CP_{pc}. Entretanto, nessa condição, o potencial de seleção das árvores pode ser prejudicado, sobretudo, nos desbastes ‘pelo alto’.

FIGURA 6 - A: CP_{pc} DOS TRATAMENTOS EM FUNÇÃO DO DAP. B: PERCENTUAL DE ENGAIOLAMENTO NOS TRATAMENTOS ESTUDADOS (n = 290).



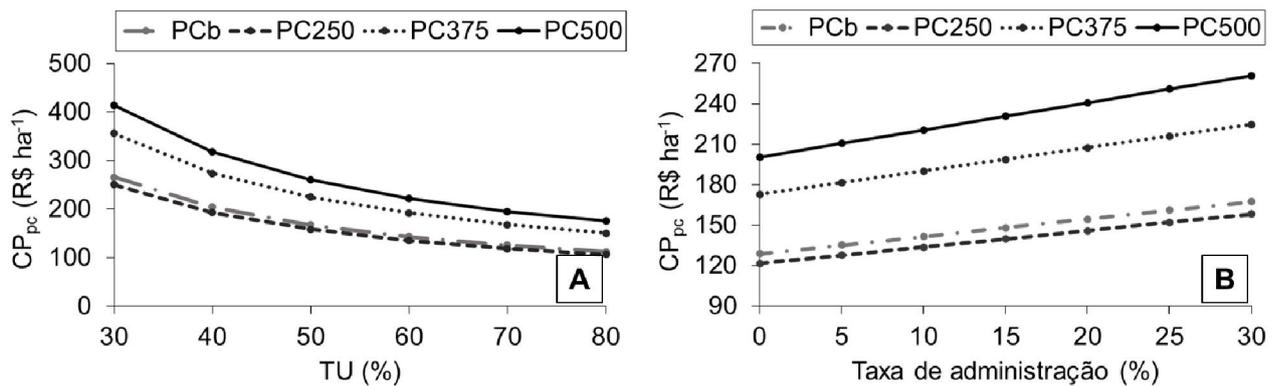
FONTE: O autor (2019).

Os percentuais de engaiolamento (E%) também mostraram-se influenciados pelos diferentes tratamentos e tipos de desbaste empregados, com valores respectivos de 19%, 25%, 15% e 10% para os tratamentos PC_b, PC₂₅₀, PC₃₇₅ e PC₅₀₀ (FIGURA 6B). De forma geral, para tratamentos em que o desbaste ‘pelo alto’ foi usado, houve tendência de aumento no E% à medida que o número de árvores derrubadas foi menor por unidade de área. Tal resultado pode ser atribuído a menor abertura de espaços adjacentes para a derrubada das árvores nos tratamentos PC₂₅₀ e PC₃₇₅ quando comparados ao PC₅₀₀. PC_b apresentou menor E% em relação à PC₂₅₀, fato explicado pelo menor tamanho das árvores derrubadas no primeiro tratamento. Esse resultado sugere que a TU no PC_b possa ser maior quando comparado a PC₂₅₀.

A variação da TU demonstrou que os custos de produção reduzem em média 58% quando a TU aumenta de 30% para 80% (FIGURA 7A), o que evidencia a importância de medidas de controle voltadas à diminuir os tempos improdutivos da

operação como forma de redução dos custos. Rocha *et al.* (2009) citam que o aumento da TU da operação pode ser conseguido por meio da melhoria do planejamento e controle das operações, bem como, pela realização de treinamento dos operadores, o que se reflete em diminuição do CP_{pc} . A variação da taxa administrativa (0 a 30%) gerou um aumento médio de 23% nos CP_{pc} dos tratamentos, considerando TU = 50% (FIGURA 7B).

FIGURA 7 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS CP_{pc} EM FUNÇÃO DA TU (A) E DA TAXA DE ADMINISTRAÇÃO (B) (n = 369).



FONTE: O autor (2019).

Em um primeiro momento, as operações de desbaste pré-comercial podem representar um custo adicional no fluxo de caixa das empresas florestais. Entretanto, essa atividade possui um custo substancialmente inferior a um primeiro desbaste comercial e, por beneficiar o crescimento das árvores remanescentes, poderá tornar os desbastes comerciais subsequentes mais rentáveis devido ao aumento do diâmetro e qualidade dessas árvores. Ademais, os custos com podas posteriores são potencialmente menores devido a diminuição da densidade de árvores por unidade de área. Para respostas mais concretas a respeito do uso dessa prescrição são recomendados estudos mais aprofundados ao longo do tempo, nos quais os efeitos do manejo devem ser avaliados.

3.6 CONCLUSÕES

Os resultados do presente estudo permitem concluir que:

- A produtividade e custo de produção das operações de desbaste pré-comercial variaram de acordo com os tratamentos estudados. O desbaste 'pelo alto'

com remoção de 250 árv. ha⁻¹ (PC₂₅₀) apresenta a maior produtividade e menor custo de produção. O desbaste 'por baixo' com remoção de 250 árv. ha⁻¹ (PC_b) e o desbaste 'pelo alto' com remoção de 375 árv. ha⁻¹ (PC₃₇₅) têm produtividades e custos intermediários, ao passo que, o desbaste 'pelo alto' com remoção de 500 árv. ha⁻¹ (PC₅₀₀) apresenta a menor produtividade e maior custo de produção.

- Em todos os tratamentos há tendência de diminuição da produtividade e aumento do custo de produção à medida que os dap's das árvores foram maiores, devido ao maior dispêndio de tempo para a derrubada das árvores.

- O custo operacional horário é de 44,89 R\$ PMH₀⁻¹, sendo o custo com o pessoal operacional o mais representativo. Enquanto o custo de produção médio dos tratamentos varia de 158,01 R\$ ha⁻¹ (PC_b) a 260,72 R\$ ha⁻¹ (PC₅₀₀).

- As taxas de utilização e de administração têm importante influência na variação do CP_{pc}, recomendando-se estudos de longo prazo dessa operação para a determinação mais precisa de ambas.

- Os tipos de desbaste e tratamentos estudados influenciam o percentual de engaiolamento do desbaste pré-comercial, sendo que em maiores intensidades de desbaste há menor percentual de engaiolamento.

- De forma geral, a realização do desbaste pré-comercial aos 5 anos de idade permite a seleção de árvores potenciais de acordo com os critérios de manejo, sem problemas operacionais consideráveis, e com custos de produção atrativos para o atual cenário. No entanto, estudos adicionais são recomendados para melhor avaliar a influência do relevo no desempenho e custos dessas operações.

4 CAPÍTULO 2 – COMPARAÇÃO DE DOIS SISTEMAS MECANIZADOS DE COLHEITA EM OPERAÇÕES DE CORTE FINAL DE *Pinus taeda*

4.1 RESUMO

O objetivo desse estudo foi comparar os sistemas mecanizados de árvores inteiras (FT) e toras curtas (CTL) em relação a aspectos técnicos e custos de produção, no corte final de povoamentos de *Pinus taeda*. Os sistemas foram avaliados por meio de estudos de tempo ao nível de elementos do ciclo de trabalho. A produtividade de cada função dos sistemas foi determinada e, no caso da etapa de extração, modelada em função das principais variáveis influentes. Os custos de produção da colheita foram determinados pela razão entre a soma dos custos operacionais horários das máquinas e a produtividade da função menos produtiva de cada sistema. Então, pela minimização da soma dos custos com colheita e estradas ($CP_{\text{colheita+estradas}}$), a densidade ótima de estradas foi estimada. Em geral, o sistema FT apresentou maior produtividade em relação ao CTL. Na densidade atual de estradas ($92,02 \text{ m ha}^{-1}$), o $CP_{\text{colheita+estradas}}$ foi de $23,19 \text{ R\$ m}^{-3}$ para o FT e $39,24 \text{ R\$ m}^{-3}$ para CTL. As densidades ótimas de estradas estimadas foram de $18,56 \text{ m ha}^{-1}$ e $13,82 \text{ m ha}^{-1}$, gerando reduções de 40,5% e 31,3% no $CP_{\text{colheita+estradas}}$ do FT e CTL, respectivamente. Conclui-se que os custos de produção apresentados pelo FT são menores em relação ao CTL. No entanto, o segundo respectivo sistema é menos sensível à maiores distâncias de extração. Dessa forma, ambos os sistemas podem ser empregados para o corte final desses povoamentos, desde que, sob condições técnicas e de mercado favoráveis.

Palavras-chave: Técnicas e operações florestais. Custos de produção. Densidade ótima de estradas. Gargalos de produção.

4.2 ABSTRACT

The aim of this study was to compare the mechanized systems of full-tree (FT) and cut-to-length (CTL) in relation to technical aspects and production costs, in *Pinus taeda* final felling. The systems were evaluated through time studies at the element level of the work cycle. The productivity of each systems functions was determined and, in the extraction stage case, modeled according to the main process variables. The harvest production costs were determined by the ratio between the sum of the machines hourly

operating costs and the productivity of the least productive function of each system. Then, by minimizing the sum of the harvest and roads costs ($CP_{\text{colheita+estradas}}$), the optimum road density was estimated. In general, the FT system presented higher productivity in relation to CTL. In the current road density (92.02 m ha^{-1}), the $CP_{\text{colheita+estradas}}$ was $23.19 \text{ R\$ m}^{-3}$ for FT and $39.24 \text{ R\$ m}^{-3}$ for CTL. The estimated optimum road densities were 18.56 m ha^{-1} and 13.82 m ha^{-1} , generating reductions of 40.5% and 31.3% in $CP_{\text{colheita+estradas}}$ of FT and CTL, respectively. We concluded that the production costs presented by FT are smaller than the CTL. However, the second system is less sensitive to longer extraction distances. In this way, both systems can be used for the final cutting of these stands, provided that, under favorable technical and market conditions.

Keywords: Forestry techniques and operations. Production costs. Optimum road density. Production bottlenecks.

4.3 INTRODUÇÃO

O sul do Brasil tem aptidão incontestável para o cultivo do gênero *Pinus*, sendo a região que lidera mundialmente o crescimento de *Pinus taeda* L., com a maior área plantada dessa espécie no país (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ, 2017). Apesar de haver predominância da utilização de regimes de manejo que visem a maximização do volume produzido por unidade de área, nos quais são obtidos produtos com menor valor de mercado, também existem produtores independentes que manejam seus povoamentos a longo prazo, buscando diversificar a produção e agregar maior valor à madeira colhida ao final da rotação.

Nesse tipo de manejo, além da adoção de rotações longas, há também a aplicação de diversas intervenções de desbaste, resultando no corte final de um número reduzido de árvores por unidade de área. Devido às prescrições do manejo, ao final do ciclo de produção, essas árvores atingem grandes dimensões, o que possibilita a geração de diversos sortimentos a partir de um mesmo indivíduo.

O elevado volume das árvores e os numerosos sortimentos alteram a dinâmica das operações de colheita florestal. Portanto, quando trabalha-se de forma mecanizada, essas operações exigem o uso de máquinas de grande porte para sua realização, pois devem ser capazes de trabalhar com árvores ou peças de madeira de pesos elevados.

No Brasil, as operações de colheita de monocultivos florestais são realizadas, predominantemente, pelos sistemas de colheita de toras curtas ou *cut-to-length* (CTL) e árvores inteiras ou *full tree* (FT) (SEIXAS; OLIVEIRA JÚNIOR, 2001). Contudo, para o gênero *Pinus*, quando adotados regimes de manejo de longo prazo, poucos estudos têm se ocupado com a análise técnica e de custos desses sistemas no país (PEREIRA et al., 2015; SOUZA et al., 2018b).

Esse fato estimula a realização de pesquisas que busquem compreender a relação entre indicadores de desempenho operacional e custos dos sistemas de colheita e as variáveis técnicas e do terreno, considerando povoamentos em que esse tipo de manejo foi empregado. As informações geradas podem subsidiar os gestores florestais na busca do melhor dimensionamento dos recursos necessários às operações, bem como, auxiliar na escolha de alternativas operacionais que reflitam menores custos de produção, e por consequência, aumentem a rentabilidade dos ativos florestais.

Tendo em vista a carência de estudos holísticos, que comparem diferentes alternativas de sistemas mecanizados para colheita florestal de povoamentos de pinus manejados em longas rotações. Esse estudo teve como objetivo, criar modelos de produtividade e custos das máquinas e realizar simulações, para comparar os sistemas FT e CTL, em operações de corte final de *Pinus taeda* L., assumindo-se as seguintes hipóteses:

- O sistema mecanizado FT apresenta menor custo de produção em relação ao CTL.
- O desempenho operacional e o custo de produção da extração são influenciados diferentemente por características do povoamento e do terreno, o que se reflete em diferentes recomendações de densidade de estradas para esses sistemas de colheita.
- A adequação da densidade de estradas pode diminuir expressivamente os custos de produção desses sistemas;
- O sistema CTL é mais versátil para maiores distâncias de extração em relação ao FT.

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

4.4.1 Características da área de estudo

O estudo foi conduzido em plantações de *Pinus taeda* de uma empresa produtora de madeira independente, localizada no município de Campo Belo do Sul, Santa Catarina, região sul do Brasil.

O povoamento florestal da área de estudo foi conduzido com 3 podas (até 5,8 m de altura) e cinco intervenções de desbaste. O método de desbaste empregado foi o misto, no qual parte das árvores foi desbastada sistematicamente e outra parte desbastada conforme o critério de seleção 'pelo alto' (SMITH *et al.*, 1997). No momento do corte final, em média a densidade (N) era de 268 árv. ha⁻¹, o diâmetro a altura do peito (dap) de 43,3 cm, altura total (h) de 32,0 m e volume individual (v_i) de 2,12 m³ árv⁻¹ (TABELA 10).

As informações médias referentes à área dos talhões, declividade, distância de extração e densidade de estradas secundárias e terciárias são apresentadas na TABELA 10. O relevo da área variava de plano a fortemente ondulado.

TABELA 10 – CARACTERÍSTICAS DO POVOAMENTO, CONDIÇÕES OPERACIONAIS E DO TERRENO NA ÁREA DE ESTUDO.

Características do povoamento		Condições operacionais e do terreno	
Idade (anos)	33	Área total do povoamento (ha)	133,7
N, média (árv. ha ⁻¹)	268	Área dos talhões, média (ha)	4,23
dap, média (cm)	43,3	Declividade, média (°)	15,23
h, média (m)	32,0	Distância de extração, média (m)	64,56
G, média (m ² ha ⁻¹)	40,20	Área ocupada com estradas (ha)	5,54
v _i , média (m ³ árv ⁻¹)	2,12	Densidade atual de estradas, média (m ha ⁻¹)	92,02
Volume médio por tora (m ³ tora ⁻¹)	0,24		
V, média (m ³ ha ⁻¹)	550,2		

FONTE: O autor (2019).

Legenda: N = densidade de árvores por hectare; dap: diâmetro à altura do peito; h = altura total; G = área transversal por hectare; v_i = volume médio individual; V = volume total por hectare.

4.4.2 Sistemas de colheita avaliados

Foram avaliados dois sistemas mecanizados de colheita florestal, o de árvores inteiras '*full-tree*' (FT) e o de toras curtas '*cut-to-length*' (CTL). Como se trata de um estudo comparativo, os fatores relacionados às condições operacionais

(características do povoamento e terreno) foram padronizados, conforme preconizado por Magagnotti e Spinelli (2012) e Ackerman et al. (2014).

No sistema FT, as árvores foram derrubadas por um *Feller direcional* marca Caterpillar modelo 324D de esteiras equipado com cabeçote Satco 630 (FIGURA 8A). A extração das árvores do interior do talhão para a margem da estrada foi efetuada por um *skidder* de garra marca John Deere modelo 748H de pneus com tração 4x4 e área da garra de 1,49 m² (FIGURA 8B). O processamento das árvores em toras foi realizado na margem da estrada por um *harvester* marca John Deere modelo 903K de esteiras com cabeçote *Log Max 10.000XT* (FIGURA 8C).

FIGURA 8 - MÁQUINAS UTILIZADAS NO SISTEMA DE COLHEITA DE ÁRVORES INTEIRAS (FT). EM QUE: A: *FELLER DIRECIONAL DE ESTEIRAS CATERPILLAR 324D COM CABEÇOTE PROCESSADOR SATCO 630*. B: *SKIDDER DE PNEUS JOHN DEERE 748H*. C: *HARVESTER JOHN DEERE 903K COM CABEÇOTE LOG MAX 10.000XT*.



FONTE: O autor (2019).

No CTL, a derrubada e processamento das árvores em toras no interior do talhão foram realizados por um *harvester* marca John Deere modelo 909MH de esteiras com cabeçote Waratah HTH624C (FIGURA 9A e 9B). A extração das toras para a margem da estrada foi efetuada por um *forwarder* marca John Deere modelo 1910E (FIGURA 9C) com pneus dianteiros e traseiros recobertos com semi-esteiras. Essa máquina apresentava tração 8x8 e capacidade de carga de 19 toneladas.

FIGURA 9 - MÁQUINAS UTILIZADAS NO SISTEMA DE TORAS CURTAS (CTL). A: MÁQUINA-BASE HARVESTER JOHN DEERE 909MH. B: CABEÇOTE HARVESTER WARATAH HTH624C. C: FORWARDER JOHN DEERE 1910E.



FONTE: O autor (2019).

O nível de experiência dos operadores no sistema FT era classificado como intermediário/avançado e cada máquina foi operada pela mesma pessoa durante o estudo. No sistema CTL, embora no decorrer do estudo as máquinas tenham sido operadas por diferentes operadores (*harvester*, 4 operadores; *forwarder*, 3 operadores), o nível de experiência destes era semelhante (inicial/intermediário), pois, as operações com esse sistema estavam iniciando na empresa, não havendo diferenças significativas quanto à esse fator.

Em ambos os sistemas, as operações de colheita foram realizadas ‘à quente’ (MALINOVSKI et al., 2014), sendo que a madeira permanecia a campo por no máximo 5 dias após a derrubada. As toras produzidas eram organizadas em diferentes pilhas na margem da estrada, conforme sua classe de sortimento, para o posterior carregamento em veículos de transporte. Foram produzidas oito classes de sortimentos de toras com diferentes valores de mercado, de acordo com o diâmetro

na ponta fina e presença/ausência de nós. Os volumes desses sortimentos variaram de 0,09 a 0,75 m³ tora⁻¹ e os comprimentos de 2,40 a 4,20 m.

4.4.3 Desempenho operacional

O desempenho operacional das máquinas de ambos os sistemas de colheita foi determinado por meio de estudo de tempos ao nível de elementos de ciclo, seguindo a abordagem de modelagem (MAGAGNOTTI e SPINELLI, 2012; ACKERMAN et al., 2014). O ciclo de trabalho de cada máquina foi dividido em etapas funcionais/elementos (TABELA 11, p. 75), dos quais foram registrados os tempos consumidos. A técnica de cronometragem foi a de tempo contínuo com o uso de cronômetro centesimal e formulários específicos.

Além do registro dos tempos, também foram medidas possíveis variáveis do processo que afetam o desempenho operacional das máquinas, para cada ciclo de trabalho. A declividade de trabalho (graus) foi determinada para todas as máquinas, exceto para o *harvester* no sistema FT. A distância de extração (DE) foi aferida para as máquinas de extração. Essas medições foram realizadas com aparelho TruPulse 360. Além disso, foi determinado o volume médio por ciclo (V_{ciclo}) ou por tora (V_{tora}) para *skidder* e *forwarder*, respectivamente.

A produtividade por hora-máquina produtiva (P_{PMH}) foi calculada pela razão entre a produção (m³) e o tempo consumido no ciclo de trabalho (PMH^{-1}). A produção em cada ciclo de trabalho foi determinada por meio da contagem do número de árvores ou toras produzidas por ciclo operacional de trabalho, conforme a máquina analisada (MAGAGNOTTI; SPINELLI, 2012).

No caso da extração de madeira com *forwarder*, o volume produzido em cada ciclo de trabalho foi determinado por meio da multiplicação do número de toras de cada sortimento pelo respectivo volume médio por tora, os quais foram previamente determinados por meio da mensuração dos diâmetros e comprimento de 30 toras de cada classe de sortimento produzida. Para as demais máquinas, foi considerado o volume médio individual das árvores para o cálculo da P_{PMH} . A produtividade por hora-máquina programada (P_{SMH}) foi determinada pela multiplicação da P_{PMH} pela taxa de utilização (TU).

TABELA 11 - ELEMENTOS DO CICLO DE TRABALHO DAS MÁQUINAS ESTUDADAS NOS SISTEMAS FT E CTL.

Sistema	Máquina	Elemento do ciclo de trabalho	Descrição	
FT	<i>Feller</i> direcional	Deslocamento	Deslocamento até a árvore a ser cortada (esteiras em movimento).	
		Busca	Busca da árvore pelo cabeçote <i>feller</i> direcional (braço hidráulico em movimento e esteiras paradas).	
		Derrubada e empilhamento	Posicionamento do cabeçote na árvore até a derrubada e empilhamento da mesma.	
	<i>Skidder</i>	Viagem vazio	Deslocamento da máquina, da margem até o interior do talhão, próximo ao feixe de árvores	
		Manobra e Carregamento	Manobra e posicionamento do feixe de árvores na garra do equipamento.	
		Viagem carregado	Arraste das árvores do interior até a margem do talhão.	
		Manobra e Descarregamento	Manobra e descarregamento do feixe de árvores na margem da estrada.	
	<i>Harvester</i>	Deslocamento	Deslocamento até a pilha de árvores a ser processada (esteiras em movimento).	
		Busca	Busca da árvore na pilha a ser processada (braço hidráulico em movimento e esteiras paradas).	
		Processamento	Posicionamento do cabeçote na árvore até o término do processamento.	
	CTL	<i>Harvester</i>	Deslocamento	Deslocamento até a árvore a ser derrubada (esteiras em movimento).
			Busca e Derrubada	Posicionamento do cabeçote e derrubada da árvore (esteiras paradas e braço hidráulico em movimento).
Processamento			Posicionamento do cabeçote na árvore derrubada até o término do processamento.	
<i>Forwarder</i>		Viagem vazio	Deslocamento da máquina da estrada até o interior do talhão (até o início do movimento da grua para carregamento).	
		Carregamento	Carregamento das toras no interior do talhão.	
		Viagem durante o carregamento	Deslocamentos entre as atividades de carregamento (pneus e semi-esteiras em movimento).	
		Viagem carregado	Deslocamento do interior do talhão até a margem da estrada (até o início do movimento da grua para descarregamento).	
		Descarregamento	Descarregamento das toras na margem do talhão.	
Todos	Todos	Interrupções	Atividades que não são englobadas no ciclo de trabalho das máquinas.	

FONTE: O autor (2019).

4.4.4 Análise dos dados e modelagem do desempenho operacional

Primeiramente, realizou-se a identificação e exclusão de *outliers*, conforme critérios citados por Tukey (1977), com o uso do Teste de Grubbs (MAGAGNOTTI; SPINELLI, 2012). Os erros relativos de amostragem foram calculados conforme

Murphy (2005). Os tempos consumidos em cada elemento do ciclo de trabalho foram analisados por meio de medidas de tendência central (média) e dispersão (desvio padrão).

Os pressupostos de normalidade e homogeneidade de variâncias foram verificados pelos testes de Kolmogorov-Smirnov e Bartlett, respectivamente (SOUZA et al., 2018a). Nos casos em que esses pressupostos não foram atendidos, a transformação da variável foi realizada.

Análise de regressão linear simples ou múltipla foram utilizadas para o ajuste de equações preditivas para estimativa da P_{PMH} (variável dependente) em função da declividade para o *feller direcional* (FT) e *harvester* (CTL), e em função da declividade, DE e V_{ciclo} (para skidder) ou V_{tora} (para *forwarder*). Nesses ajustes, também foram testadas transformações das variáveis independentes, devendo essas, serem significativas ao nível de 5% de probabilidade para entrada na equação.

As equações ajustadas foram avaliadas pelo coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$), erro padrão da estimativa absoluto (S_{yx}) e erro padrão da estimativa relativo ($S_{yx}\%$), recalculados em caso de transformação da variável independente. Adicionalmente, a dispersão gráfica dos resíduos foi analisada. A independência dos resíduos foi testada pelo teste de Durbin-Watson (SOUZA et al., 2018a).

Em caso de significância das equações ($p < 0,05$), as mesmas foram usadas para simular a flutuação da P_{PMH} considerando variações nos valores médios de V_{ciclo} , V_{tora} e DE, conforme a máquina analisada, considerando a declividade média do projeto (TABELA 10). A relação entre variáveis independentes foi verificada por meio do coeficiente de correlação de Pearson (r).

4.4.5 Custos horários e de produção das operações de colheita

Os custos horários e de produção foram determinados conforme metodologia proposta por Miyata (1980). Assumiu-se uma TU de 60% para as máquinas do sistema FT (ROCHA et al., 2009), devido a maior propensão ao estrangulamento da produção das máquinas deste sistema, enquanto que para o sistema CTL foi adotada uma TU de 70% (SPINELLI et al., 2004). Todos os dados e taxas utilizadas (TABELA 12) foram obtidos com a empresa ou determinados à campo e são referentes ao período de julho/agosto de 2016 (US\$ 1,00 = R\$ 3,27).

TABELA 12 – PRESSUPOSTOS ASSUMIDOS PARA O CÁLCULO DO CUSTO OPERACIONAL HORÁRIO DAS MÁQUINAS NOS SISTEMAS ESTUDADOS.

Pressupostos	FT					CTL		
	<i>Feller-direcional</i>		<i>Skidder</i>	<i>Harvester</i>		<i>Harvester</i>		<i>Forwarder</i>
	Mb	Impl.		Mb	Impl.	Mb	Impl.	
Valor de aquisição (R\$)	837.000	295.000	1.115.000	1.300.000	550.000	1.804.860	692.640	1.365.275
Valor de revenda (%)	20	5	20	20	5	20	5	20
Vida útil (PMH ₀)	20.000	12.000	20.000	20.000	12.000	20.000	12.000	20.000
Utilização (SMH ano ⁻¹)	2.323		2.323	2.323		4.646		4.646
Taxa de utilização (%)	60		60	60		70		70
Pessoal operacional (n)	1,1		1,1	1,1		2,2		2,2
Mão de obra (R\$ SMH ⁻¹)	26,12		25,70	25,62		22,08		20,01
Taxa de juros e seguros (%)	4		4	4		4		4
Manutenção (% depreciação)	90%		100%	110%		110%		75%
Consumo específico (L PMH ⁻¹)	22,0		16,0	30,0		34,7		20,67
Preço do óleo diesel (R\$ L ⁻¹)	3,01		3,01	3,01		3,01		3,01
Preço de pneu/esteira (R\$)	55.000		12.000	65.000		100.000		12.000
Vida útil pneu/esteira (PMH)	12000		10000	12000		12000		10000

FONTE: O autor (2019).

Légenda: Mb = máquina-base; Impl. = implemento.

O custo operacional horário (COH) dos sistemas (em R\$ PMH₀⁻¹ e R\$ SMH⁻¹) foi determinado por meio da soma do COH das máquinas de cada sistema. A estimativa do custo de produção da colheita em cada sistema (CP_{colheita}, R\$ m⁻³), foi realizada conforme Rummer; Klepac (2002). Para tal, foi assumida uma condição de balanceamento da operação, onde o número de máquinas de cada função foi dimensionado para atendimento de uma meta mínima mensal de produção de 10.000 m³ mês⁻¹. Além disso, a abordagem considerou que a P_{PMH} máxima do sistema é limitada pela máquina/função de menor produtividade. Assim, o CP_{colheita} foi determinado pela razão entre o custo operacional horário do sistema e a produtividade da máquina/função menos produtiva.

4.4.6 Comparação dos sistemas em diferentes cenários

Os desempenhos e custos dos sistemas de colheita foram comparados diante de dois cenários de densidade de estradas, considerando a condição de declividade média da área de estudo (15,23°). No primeiro cenário, foi considerada a densidade atual de estradas secundárias e terciárias (DAE) da área de estudo (92,02 m ha⁻¹). No

segundo cenário, os sistemas de colheita foram comparados diante de uma situação ótima de densidade de estradas (DOE).

A DOE foi determinada pelo método indireto (RYAN et al., 2004; ZAGONEL, 2005; SOUZA et al., 2018b) e estimada por solução analítica, sendo definida como a densidade de estradas que proporciona a minimização do custo total de produção ($CP_{\text{colheita+estradas}}$).

Na metodologia empregada nos trabalhos previamente citados, os autores consideraram que esse custo é resultado da soma dos custos de extração (sem considerar atividades de corte) e custos com estradas. Entretanto, como o intuito do presente estudo é comparar sistemas de colheita, foi assumido que o $CP_{\text{colheita+estradas}}$ é resultado do somatório dos custos com a colheita (derrubada, processamento e extração da madeira) e custos com estradas (construção, manutenção e perda de área produtiva), considerando ainda, a condição de balanceamento da operação, como citado anteriormente.

Na DAE, o custo médio com construção de estradas (C_c) era de 4,96 R\$ m⁻³, o custo com manutenção de estradas (C_m) de 3,06 R\$ m⁻³ e custo com perda de área produtiva (C_{pap}) de 6,42 R\$ m⁻³. Todos os custos de produção com estradas (CP_{estradas}) foram obtidos com a empresa onde o estudo foi realizado e são referentes ao período de julho/agosto de 2016. Para as simulações, a relação entre o CP_{estradas} e a quantidade de estradas (m ha⁻¹) foi assumida como linear.

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.5.1 Erros amostrais, estatística descritiva e tempos consumidos nos elementos do ciclo de trabalho

Os erros de amostragem relativos para P_{PMH} foram menores que 7% para todas as máquinas estudadas (TABELA 13, p. 79).

O *feller* direcional apresentou maior dispêndio de tempo na derrubada e empilhamento das árvores (44%), o que decorre da necessidade de organização dos feixes para posterior extração. A P_{PMH} média dessa máquina foi 137,1 m³ PMH^{o-1} (TABELA 13).

TABELA 13 – ERROS AMOSTRAIS, TEMPOS CONSUMIDOS NOS ELEMENTOS DO CICLO DE TRABALHO E ESTATÍSTICA DESCRITIVA PARA AS MÁQUINAS DOS SISTEMAS FT E CTL.

Sistema de colheita	FT			CTL	
Máquina	<i>Feller</i> direcional	<i>Skidder</i>	<i>Harvester</i>	<i>Harvester</i>	<i>Forwarder</i>
Duração do estudo, turnos	2,5	5,6	4,2	6,8	14,7
Duração das observações válidas, SMH	19,5	25,3	30	38,2	96,1
Número de observações válidas, ciclos	577	243	876	351	170
Erro de amostragem relativo, %	3,4	4,2	2,8	2,8	6,9
Tempo médio do elemento, segundos (desvio padrão)					
Deslocamento	18,3 (30,8)	-	0,9 (9,4)	21,8 (14,0)	-
Busca ¹ / Busca e derrubada ²	25,5 (18,2)	-	14,1 (13,5)	39,1 (21,4)	-
Derrubada e empilhamento ³	33,9 (24,1)	-	-	-	-
Processamento ⁴	-	-	78,9 (38,5)	162,2 (55,0)	-
Viagem vazio	-	43,9 (19,7)	-	-	140,5 (107,4)
Manobra e carregamento	-	35,5 (24,2)	-	-	544,6 (253,9)
Viagem durante o carregamento ⁵	-	-	-	-	154,7 (137,0)
Viagem carregado	-	62,2 (24,5)	-	-	153,8 (106,4)
Manobra e descarregamento	-	68,8 (26,2)	-	-	459,4 (171,7)
Interrupções, %	36,1	43,3	23,8	28,9	28,6
V _{ciclo} - média, m ³	2,38	6,8	2,38	2,29	10,9
V _{ciclo} - amplitude, m ³	1,5 - 3,1	2,4 - 14,3	1,5 - 3,1	1,4 - 3,0	1,7 - 22,7
DE - média, m	-	110,7	-	-	134,2
DE - amplitude, m	-	27,0 - 284,0	-	-	32,1 - 334,6
P _{PMH} , m ³ PMH ₀ ⁻¹	137,1	122,9	108,6	39,3	29,4
P _{SMH} , m ³ SMH ⁻¹	87,7	69,7	82,8	27,9	20,6
Volume total produzido no estudo, m ³	1373,3	2111,1	2084,9	1022,4	1847,8
Declividade, média (°)	4,2	4,0	-	7,9	8,2
Declividade, amplitude (°)	0,3 - 9	0 - 15	-	0,5 - 23,1	0,9 - 27,7
N, média (árv. ha ⁻¹)		268		284	
dap, média (cm)		43,3		42,6	
h, média (m)		32,0		33,6	
G, média (m ² ha ⁻¹)		39,5		40,48	
v _i (m ³ árv. ⁻¹)		2,38		2,29	

FONTE: O autor (2019).

Legenda: ¹Feller direcional e harvester (FT); ²Harvester (CTL); ³Feller direcional (FT); ⁴Harvester (FT e CTL); ⁵Forwarder (CTL).

O processamento foi a etapa que dispendeu maior tempo no ciclo de trabalho do *harvester*, em ambos os sistemas (FT = 84% e CTL = 73%) (TABELA 13). Os tempos consumidos pelo *harvester* no sistema CTL, para todos os elementos do ciclo,

foram superiores quando comparados ao FT, devido a maior facilidade de trabalho no segundo sistema (processamento à margem da estrada).

O nível inicial/intermediário de experiência dos operadores (GHAFFARIYAN et al., 2012), associado à presença de afloramentos rochosos contribuíram para o baixo valor médio de P_{PMH} na derrubada e processamento das árvores no CTL ($39,3 \text{ m}^3 \text{ PMH}_0^{-1}$) (TABELA 13, p. 79), quando comparada a Strandgard et al. (2013) e Walsh; Strandgard (2014), que estudaram o desempenho do *harvester* em povoamentos de *Pinus radiata* com regime de manejo semelhante. Isso sugere potencial de melhoria para esse indicador, à medida que a experiência dos operadores aumente.

No FT, o processamento apresentou P_{PMH} média de $108,3 \text{ m}^3 \text{ PMH}_0^{-1}$ (TABELA 13, p. 79), superior aos valores encontrados por Ghaffariyan et al. (2012) e Scorupski et al. (2017), os quais avaliaram o processamento de árvores com *harvester* em outras condições operacionais e de povoamento.

Na extração, os tempos em viagem vazio/carregado representaram 50% e 31% do ciclo de trabalho do *skidder* e *forwarder*, ao passo que, atividades de manobra e carregamento/descarregamento apresentaram valores de 50% e 69%, respectivamente (TABELA 13, p. 79).

Os tempos dos elementos do ciclo do *forwarder* estão em concordância com resultados disponíveis na literatura (SPINELLI et al., 2004; GHAFFARIYAN et al., 2012; SEIXAS; CASTRO, 2014). Entretanto, para o *skidder*, a literatura reporta, que geralmente, atividades de viagem vazio/carregado ocupam a maior parte do ciclo de trabalho (SEIXAS; CASTRO, 2014), o que difere dos resultados do presente estudo, em que a manobra e descarregamento foi o elemento mais representativo (33%). Esse comportamento ocorre devido às dimensões e peso das árvores exigirem tempos adicionais na organização dos feixes à margem da estrada, em virtude dos talhões apresentarem restrições de espaço para a disposição dos mesmos.

A P_{PMH} do *forwarder* ($29,4 \text{ m}^3 \text{ PMH}_0^{-1}$) foi consideravelmente inferior à relatada por Ghaffariyan et al. (2012) ($80,9 \text{ m}^3 \text{ PMH}_0^{-1}$) e Strandgard et al. (2017) ($43,6 \text{ m}^3 \text{ PMH}_0^{-1}$), que estudaram a extração de toras de *Pinus radiata* com *forwarder* na Austrália. O baixo nível de experiência dos operadores aliado às diferenças nos volumes por tora e distâncias de extração explicam essas diferenças. Para o *skidder*, esse indicador foi superior ($122,9 \text{ m}^3 \text{ PMH}_0^{-1}$) ao reportado por Pereira et al. (2015)

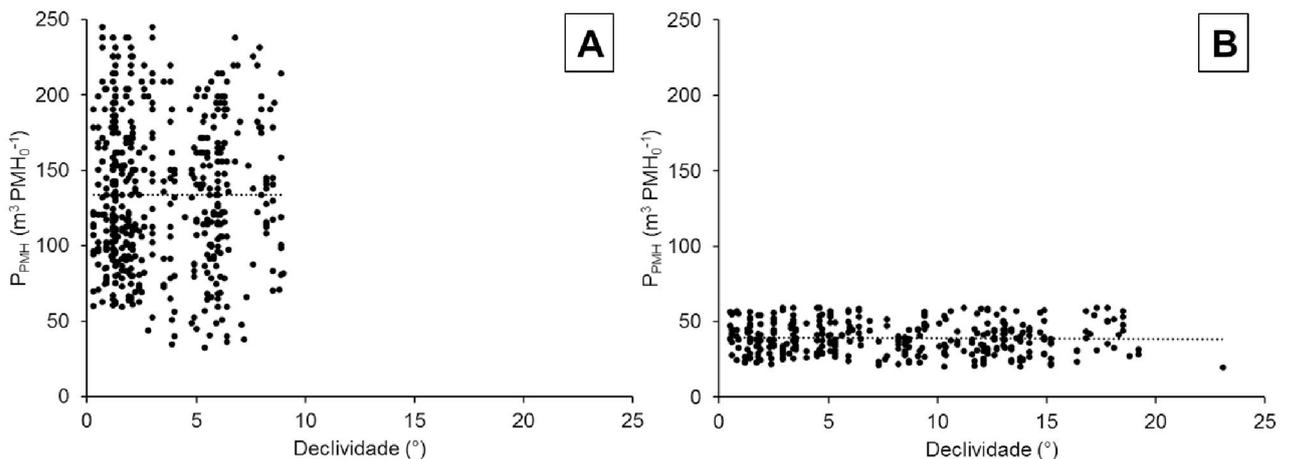
(46,14 m³ PMH₀⁻¹), que trabalhou com v_i menor (1,61 m³ árv.⁻¹) e DE similar (>100 m) ao presente estudo.

As interrupções consumiram de 23,8 a 43,3% do tempo observado no FT e em média 29% para as máquinas do CTL. Tais valores denotam maiores percentuais no primeiro sistema, o que sugere o uso de menores TU para as projeções no mesmo. Entretanto, para maior assertividade, a utilização de dados de longo prazo é recomendada para a determinação do percentual de interrupções (MAGAGNOTTI; SPINELLI, 2012).

4.5.2 Influência das condições de trabalho na produtividade das máquinas

A análise de regressão evidenciou não haver relações significativas entre a declividade e P_{PMH} do *feller* direcional (FT) e *harvester* (CTL) ($p = 0,23$ e $0,57$, respectivamente) (FIGURA 10). Portanto, a média dessa variável foi considerada nos cenários projetados.

FIGURA 10 - VARIAÇÃO DA P_{PMH} EM FUNÇÃO DA DECLIVIDADE ($p > 0,05$). A: *FELLER* DIRECIONAL (FT). B: *HARVESTER* (CTL).



FONTE: O autor (2019).

A análise de regressão múltipla demonstrou que as P_{PMH} do *skidder* e *forwarder* foram influenciadas ($p < 0,01$) pelo volume por ciclo (*skidder*) e volume por tora (*forwarder*), declividade do terreno e distância de extração ($R^2_{aj.} = 0,56$ e $0,69$; $Syx\% = 21,1\%$ e $23,9\%$, respectivamente) (TABELA 14).

TABELA 14 – ESTATÍSTICAS DE AJUSTE DAS REGRESSÕES PARA ESTIMATIVA DA P_{PMH} DAS MÁQUINAS DE EXTRAÇÃO DOS SISTEMAS FT E CTL ($p < 0,001$).

Máquina (sistema)	Regressão	$R^2_{aj.}$	Syx	Syx%	F
Skidder (FT)	$P_{PMH} = (7,166 - 0,375 * \sqrt{x_1} + 3,092 * \sqrt{x_2} - 0,088 * x_3)^2$	0,56	26,9	21,1	113,9***
Forwarder (CTL)	$P_{PMH} = (10,573 - 0,460 * \ln(x_1) + 1,398 * \ln(x_2) - 0,347 * \sqrt{x_3})^2$	0,69	7,0	23,9	140,4***

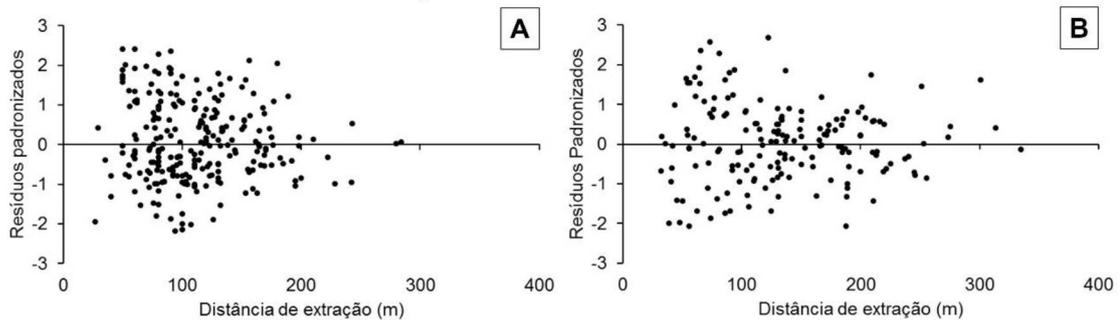
FONTE: O autor (2019).

Legenda: x_1 : distância de extração (m); x_2 : volume por ciclo para o *skidder* ($m^3 \text{ ciclo}^{-1}$) e volume por tora para o *forwarder* ($m^3 \text{ tora}^{-1}$); x_3 : declividade (graus); ln: logaritmo natural; ***significativo ($p < 0,001$).

O volume por ciclo (*skidder*) e volume por tora (*forwarder*) apresentaram relação positiva com a P_{PMH} , ao passo que, a distância de extração e declividade tiveram relação negativa. A dependência do desempenho dessas máquinas em relação a essas variáveis é reportada por outros autores, corroborando os resultados do presente estudo (BEHJOU et al., 2008; ROCHA et al., 2009; GHAFFARIYAN et al., 2012; WALSH; STRANDGARD, 2014; STRANDGARD et al., 2017).

A análise gráfica não evidenciou tendências aparentes dos resíduos em função da distância de extração (FIGURA 11A e 11B) e o teste de Durbin-Watson apontou a inexistência de autocorrelação dos resíduos ($p = 0,73$ e $0,10$ para *skidder* e *forwarder*, respectivamente).

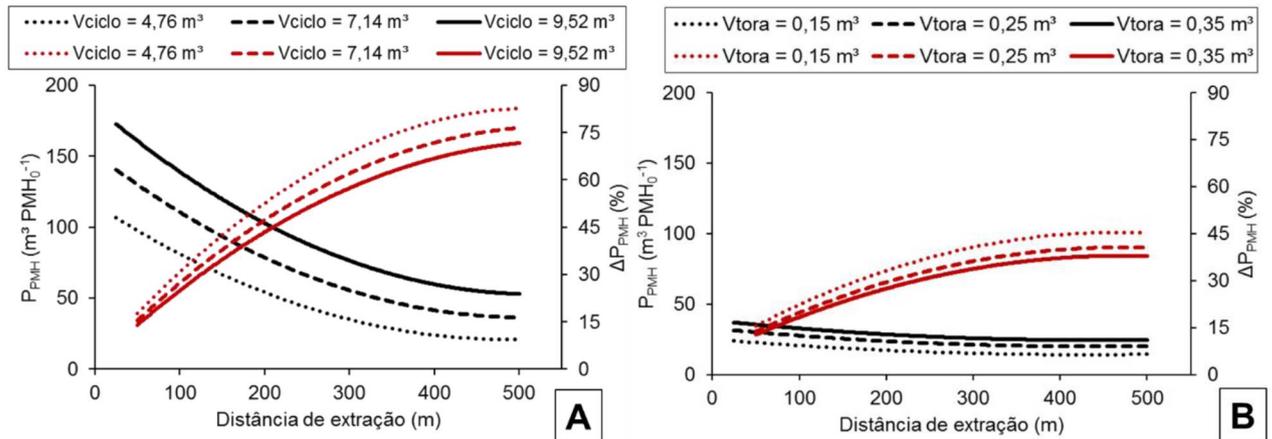
FIGURA 11 – RESÍDUOS PADRONIZADOS EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DE EXTRAÇÃO PARA AS MÁQUINAS DE EXTRAÇÃO. A: SKIDDER. B: FORWARDER.



FONTE: O autor (2019).

Para as condições do projeto (declividade = $15,23^\circ$), maiores distâncias de extração resultaram em menores P_{PMH} das máquinas de extração (FIGURA 12A e 12B). Essa tendência foi ainda mais pronunciada, para menores volumes por ciclo (*skidder*) e volumes por tora (*forwarder*). Portanto, a volumetria dos povoamentos influencia diretamente o desempenho das máquinas, no sentido que, mantendo as demais condições operacionais, maiores volumes individuais das árvores resultariam na melhoria do desempenho dessas máquinas (FIGURA 12A e 12B).

FIGURA 12 – VARIACÃO DA P_{PMH} DA EXTRAÇÃO EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DE EXTRAÇÃO, PARA DIFERENTES VOLUMES POR CICLO (V_{ciclo}) E POR TORAS (V_{tora}) (DECLIVIDADE = 15,23°). A: SKIDDER. B: FORWARDER. LINHA PRETA: P_{PMH} . LINHA VERMELHA: ΔP_{PMH} . PARÂMETROS DOS MODELOS SÃO APRESENTADOS NA TABELA 14.



FONTE: O autor (2019).

Legenda: $\Delta P_{PMH} = \frac{(P_{PMH(25m)} - P_{PMH(DE_i)})}{P_{PMH(25m)}} * 100$ $P_{PMH(25m)}$: produtividade por hora-máquina produtiva na distância de extração de 25 m; $P_{PMH(DE_i)}$: produtividade por hora-máquina produtiva na i -ésima distância de extração ($i = 100$ a 500).

O decréscimo percentual da P_{PMH} (ΔP_{PMH}) com o aumento da distância de extração foi maior para o *skidder* e *forwarder*, quando menores volumes por ciclo e por tora foram extraídos, respectivamente (FIGURA 12A e 12B). No caso do *forwarder*, o volume por tora refletiu o volume por ciclo ($r = 0,63$; $p < 0,05$). Portanto na extração de toras com menores dimensões, houve subutilização do compartimento de carga do mesmo (SEIXAS; CASTRO, 2014), o que se reflete na redução do volume por ciclo e da P_{PMH} dessa máquina.

A P_{PMH} do *skidder* (FIGURA 12A) foi expressivamente superior à do *forwarder* (FIGURA 12B). Entretanto, evidentemente, o *skidder* apresentou maior sensibilidade ao aumento da distância de extração, o que decorre do maior consumo de tempos em viagem quando comparado ao *forwarder*, que consome maior parte do ciclo de trabalho em atividades passivas (TABELA 13).

4.5.3 Custos da colheita

Os custos operacionais horários médios foram 949,88 e 734,40 R\$ PMH_0^{-1} para os sistemas FT e CTL, respectivamente (TABELA 15).

TABELA 15 – VALORES MÉDIOS DA P_{PMH} , CUSTOS OPERACIONAIS HORÁRIOS E CONSUMO DE COMBUSTÍVEL PARA AS MÁQUINAS DOS SISTEMAS FT E CTL. PARA DECLIVIDADE = 15,23°; DISTÂNCIA DE EXTRAÇÃO = 64,56 m; VOLUME POR CICLO DO SKIDDER = 6,80 m³; VOLUME POR TORÁ PARA O FORWARDER = 0,24 m³. PARÂMETROS DOS MODELOS SÃO APRESENTADOS NA TABELA 14.

Sistema	FT			CTL	
	<i>Feller</i> -direcional (derrubada)	<i>Skidder</i> (extração)	<i>Harvester</i> (processamento)	<i>Harvester</i> (derrubada e processamento)	<i>Forwarder</i> (extração)
P_{PMH} , média (m ³ PMH ⁰⁻¹)	137,1	123,1	108,6	39,3	28,2
Consumo de combustível, média (L m ⁻³)	0,16	0,13	0,28	0,88	0,73
Custo operacional horário (R\$ PMH ⁰⁻¹)	281,30	233,15	435,44	494,68	239,72
Custo de produção, média (R\$ m ⁻³)	2,05	1,89	4,01	12,60	8,51
Custo de produção do sistema, média (R\$ m ⁻³)		7,95		21,10	

FONTE: O autor (2019).

Em decorrência da menor P_{PMH} do CTL, esse sistema apresentou consumo de combustível (1,61 L m⁻³) consideravelmente superior ao FT (0,57 L m⁻³), o que denota que o segundo sistema apresentou maior eficiência energética em relação ao primeiro, respectivamente.

O custo com combustível (21,5%) foi o mais representativos no FT, seguido de, manutenção (21,1%) e depreciação (20,7%) (TABELA 16). Para o CTL, os mesmos itens de custos foram os mais representativos, porém, o maior foi com a depreciação (24,7%), seguida de, manutenção (24,6%) e combustível (22,7%) (TABELA 16).

TABELA 16 – CUSTOS OPERACIONAIS HORÁRIOS DAS MÁQUINAS DOS SISTEMAS FT E CTL.

Custos (R\$ PMH ⁰⁻¹)	FT			CTL	
	<i>Feller</i> -direcional	<i>Skidder</i>	<i>Harvester</i>	<i>Harvester</i>	<i>Forwarder</i>
Fixos					
Depreciação	56,83	44,60	95,54	127,03	54,61
Pessoal operacional	47,16	46,40	46,26	34,16	30,97
Juros e seguros	19,99	20,09	32,58	20,33	11,17
Variáveis					
Combustível	66,22	48,16	90,30	104,45	62,22
Óleo hidráulico e lubrificantes	9,93	7,22	22,58	15,67	12,44
Material rodante	9,17	4,80	10,83	16,67	9,60
Manutenção	51,15	44,60	105,10	139,73	40,96
Administrativos	20,84	17,27	32,25	36,64	17,76
Custo operacional horário	281,30	233,15	435,44	494,68	239,72

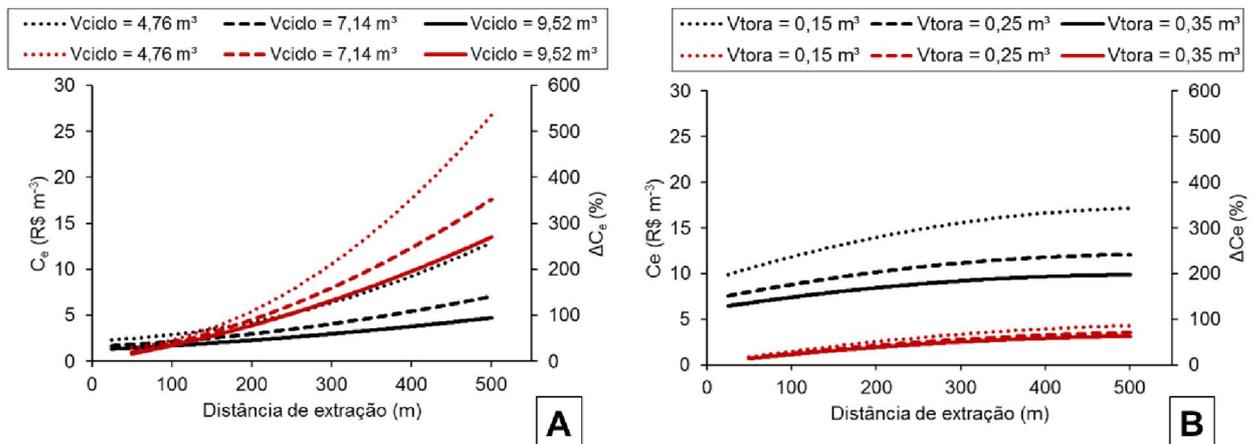
FONTE: O autor (2019).

Considerando-se isoladamente as máquinas, sem considerar o balanceamento do sistema, verificou-se que no FT, o *harvester* apresentou o maior consumo de combustível e o maior custo de produção (4,01 R\$ m⁻³), sendo esse o mais representativo (50,4%) para esse sistema. No CTL a derrubada e processamento (12,60 R\$ m⁻³) representaram 59,7% dos custos de produção com a colheita.

O FT teve custo de produção médio da colheita inferior (7,95 R\$ m⁻³) ao CTL (21,10 R\$ m⁻³), devido à maior produtividade de suas máquinas (TABELA 15, p. 84). Isso ocorreu em função de haver maior especificidade das tarefas desempenhadas pelas máquinas no primeiro sistema, o que resulta em menor custo de produção em relação ao segundo, respectivamente (ADEBAYO et al., 2007). Contudo, a diferença no custo de produção entre os dois sistemas possivelmente diminuirá com o aumento da experiência dos operadores no CTL, comportamento também esperado para o consumo de combustível por metro cúbico de madeira produzido.

Da mesma maneira que a P_{PMH} variou em função do volume por ciclo (*skidder*), volume por tora (*forwarder*), declividade do terreno e distância de extração (FIGURA 12A e 12B, p. 83), os custos de extração também se mostraram influenciados por essas variáveis (FIGURA 13A e 13B).

FIGURA 13 – VARIAÇÃO DO CUSTO DE EXTRAÇÃO (C_e) EM FUNÇÃO DA DE, PARA DIFERENTES VOLUMES POR CICLO (V_{ciclo}) E POR TORA (V_{tora}) (DECLIVIDADE = 15,23°). A: SKIDDER. B: FORWARDER. LINHA PRETA: C_e . LINHA VERMELHA: ΔC_e .



FONTE: O autor (2019).

Legenda: $\Delta C_e = \frac{(C_{e(DEi)} - C_{e(25m)})}{C_{e(25m)}} * 100$, $C_{e(DEi)}$: custo de extração na i -ésima distância de extração ($i = 100$ a 500); $C_{e(25m)}$: custo de extração na distância de extração de 25 m.

O custo de extração foi maior para distâncias de extração mais longas, sobretudo, quando menores volmes por ciclo (*skidder*) e por tora (*forwarder*) foram extraídos.

O acréscimo do custo de extração (ΔC_e) em função da distância de extração no FT apresentou comportamento exponencial, ao passo que, para CTL o aumento foi logarítmico. No FT, quando a extração é realizada nas condições de volume por ciclo igual a $7,14 \text{ m}^3 \text{ ciclo}^{-1}$ e declividade de $15,23^\circ$, o custo de extração seria de $1,56 \text{ R\$ m}^{-3}$ para uma distância de 25 m. Mantendo as demais condições, o custo teria um aumento de 358% quando a extração é realizada a uma distância de 500 m (FIGURA 13A, p. 85).

No CTL, considerando a mesma variação na distância, o acréscimo no custo de extração seria de 72%, para a mesma condição de declividade e volume por tora de $0,25 \text{ m}^{-3} \text{ tora}^{-1}$ (FIGURA 13B, p. 85). Dessa forma, distâncias de extração longas favorecem a utilização do sistema CTL, onde a madeira é baldeada ao invés de arrastada (HAN et al., 2004; SPINELLI; MAGANOTTI, 2010).

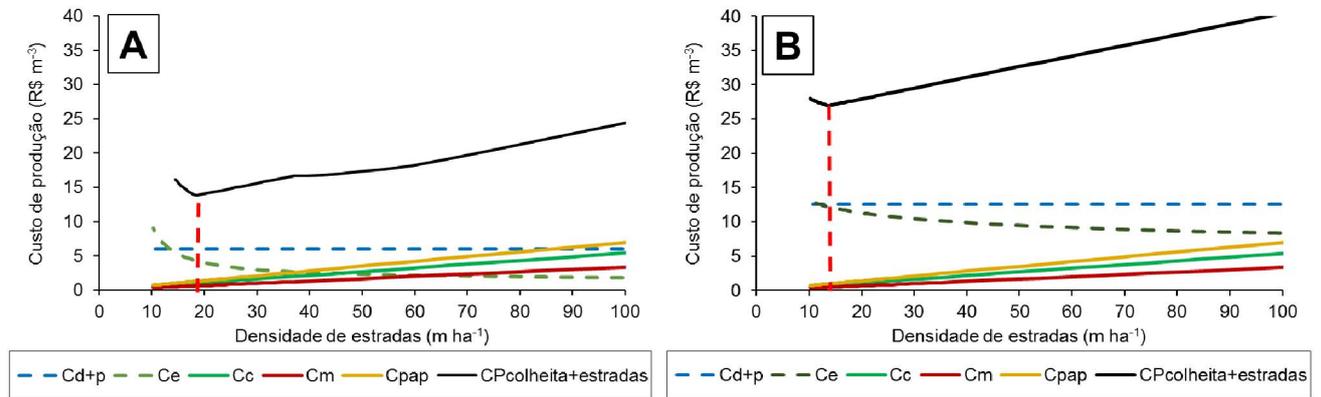
Cabe ressaltar que no CTL, sortimentos menores têm sua distância econômica de extração reduzida, quando comparados a sortimentos de maiores dimensões, devido ao maior custo de extração e menor valor de mercado desses produtos. No caso do FT, o mesmo comportamento poderia ser observado, caso houvesse redução nos volumes individuais das árvores extraídas.

O aumento da área útil da garra do *skidder* e do compartimento de carga do *forwarder* (WALSH; STRANDGARD, 2014) diminuiriam o impacto da distância de extração nos custos dessas máquinas. Ademais, para que esse impacto seja reduzido, o procedimento operacional dessas máquinas deve preconizar a maximização do volume por ciclo em maiores distâncias de extração, principalmente em povoamentos com menores volumes médios individuais das árvores.

4.5.4 Cenários projetados

Para as condições médias de estudo (TABELA 10, p. 71), os cenários projetados sugerem reduções na DAE (92 m ha^{-1}) para que haja diminuição do $CP_{\text{colheita+estradas}}$ dos sistemas. As DOE's determinadas para FT e CTL foram de 18,56 e $13,82 \text{ m ha}^{-1}$, respectivamente (FIGURA 14A e 14B).

FIGURA 14 – VARIACÃO DOS CUSTOS DE DERRUBADA E PROCESSAMENTO (C_{d+p}), EXTRAÇÃO (C_e), CONSTRUÇÃO DE ESTRADAS (C_c), MANUTENÇÃO DE ESTRADAS (C_m), PERDA DE ÁREA PRODUTIVA (C_{pap}) E CUSTO TOTAL DE PRODUÇÃO ($CP_{colheita+estradas}$) EM FUNÇÃO DA DENSIDADE DE ESTRADAS. A: SISTEMA FT. B: SISTEMA CTL.



FONTE: O autor (2019).

Legenda: linha tracejada vermelha indica a DOE. C_{d+p} do sistema FT inclui os custos do *feller*-direcional e do *harvester*.

Comportamento semelhante foi relatado por Souza et al. (2018b), que realizaram estudo nas mesmas condições e indicaram densidades de estradas de 22,85 e 15,63 m ha⁻¹ para os sistemas FT e CTL, respectivamente. Entretanto, esses autores consideraram a minimização dos custos com estradas e extração, diferentemente do presente estudo, onde o balanceamento das máquinas e o custo total do sistema (incluindo a etapa de derrubada e processamento) foram considerados na determinação da DOE.

Ao analisar o balanceamento de ambos os sistemas, no cenário DAE ($D_{estradas} = 92$ m ha⁻¹), o sistema FT necessitou de apenas 1 *skidder* trabalhando 1 turno por dia, para o cumprimento da meta mínima estabelecida (10.000 m³ mês⁻¹), ao passo que, no CTL eram necessários 2 *forwarders* desempenhando sua função em 2 turnos de trabalho por dia. Nessa condição, a produtividade do FT era limitada pelo processamento das árvores (65,2 m³ SMH⁻¹), enquanto, no CTL, a função de derrubada e processamento foi a menos produtiva (27,5 m³ SMH⁻¹) (TABELA 17).

Na DOE, o dimensionamento do CTL pôde ser mantido. Entretanto, em decorrência da diminuição da densidade de estradas, haveria a necessidade de utilização de um *skidder* adicional no FT, para que a meta mínima de produção fosse cumprida e as demais condições estipuladas atendidas (TABELA 17). Nesse cenário, os gargalos de produção continuaram sendo as funções supracitadas na DAE.

Contudo, houve balanceamento da produtividade da extração em relação as mesmas, o que minimizou o $CP_{\text{colheita+estradas}}$ em ambos os sistemas.

TABELA 17 – CENÁRIOS DE DENSIDADE DE ESTRADAS ATUAL (DAE) E ÓTIMA (DOE) PARA OS SISTEMAS FT E CTL CONSIDERANDO O BALANCEAMENTO DOS SISTEMAS E CONDIÇÕES MÉDIAS DE ESTUDO (DECLIVIDADE = 15,23°, VOLUME POR CICLO DO SKIDDER = 6,8 m³ E VOLUME MÉDIO POR TORA PARA O FORWARDER = 0,24 m³).

Sistema	FT			CTL	
	Feller-direcional (derrubada)	Skidder (extração)	Harvester (processamento)	Harvester (derrubada e processamento)	Forwarder (extração)
Número de turnos	1			2	
Máxima utilização (%)	60	60	60	70	70
Cenário DAE	D_{estradas} = 92 m ha⁻¹			D_{estradas} = 92 m ha⁻¹	
Dimensionamento (n° máquinas)	1	1	1	1	2
P _{PMH} da função no sistema, média (m ³ SMH ⁻¹)	82,3	73,9	65,2	27,5	39,4
P _{PMH} do sistema, média (m ³ SMH ⁻¹)		65,2		27,5	
Custo operacional horário do sistema (R\$ SMH ⁻¹)		569,93		681,88	
Custo com colheita do sistema (R\$ m ⁻³)		8,75		24,80	
Custo com estradas (R\$ m ⁻³)		14,44		14,44	
Custo com colheita + estradas (R\$ m ⁻³)		23,19		39,24	
Cenário DOE	D_{estradas} = 18,56 m ha⁻¹			D_{estradas} = 13,82 m ha⁻¹	
Dimensionamento (n° máquinas)	1	2	1	1	2
P _{PMH} da função no sistema, média (m ³ SMH ⁻¹)	82,3	65,8	65,2	27,5	27,6
P _{PMH} do sistema, média (m ³ SMH ⁻¹)		65,2		27,5	
Custo operacional horário do sistema (R\$ SMH ⁻¹)		709,82		681,88	
Custo com colheita do sistema (R\$ m ⁻³)		10,89		24,80	
Custo com estradas (R\$ m ⁻³)		2,91		2,17	
Custo com colheita + estradas (R\$ m ⁻³)		13,80		26,97	

FONTE: O autor (2019).

Legenda: D_{estradas}: densidade de estradas; P_{SMH}: produtividade por hora-máquina programada; SMH: hora-máquina programada.

Em ambos os cenários (DAE e DOE), o sistema CTL necessitaria de 2 turnos de trabalho para o cumprimento da meta estabelecida, enquanto o FT precisaria de

apenas 1 turno. Dessa forma, como a escala de produção fixada no presente estudo é pequena, poderia haver subutilização das máquinas do FT. Isso sugere que, para maiores escalas de produção, esse sistema se sobressairia em relação ao CTL, devido a sua maior capacidade produtiva.

No FT a adequação da DAE para a DOE resultaria em aumento de 24,4% no custo de produção da colheita. Contudo, haveria diminuição de 79,8% no custo de produção com estradas, o que geraria redução de 40,5% no $CP_{\text{colheita+estradas}}$. Para o CTL, a adoção da DOE parece ser ainda mais importante, já que o custo de produção da colheita não sofre aumento e há diminuição de 85% no custo de produção com estradas, resultando em redução de 31,3% no $CP_{\text{colheita+estradas}}$ (TABELA 17, p. 88).

Num cenário de otimização da densidade de estradas, o sistema FT apresentou $CP_{\text{colheita+estradas}}$ equivalente a aproximadamente 51% daquele apresentado pelo CTL. Entretanto, no estudo, além das diferenças inerentes à experiência dos operadores, as condições do povoamento e do terreno foram em média mais restritivas para o CTL (TABELA 10, p. 71). Dessa forma, mesmo que tenha-se buscado a padronização da declividade e das condições de povoamento para a geração dos cenários, a diferença na habilidade dos operadores contribuiu para que os valores estimados dos custos no CTL fossem ainda maiores em relação ao FT.

No entanto, ainda que seja considerado um cenário hipotético, onde a evolução da experiência dos operadores do CTL geraria aumentos de 45% e 25% na produtividade do *harvester* e *forwarder*, respectivamente. O $CP_{\text{colheita+estradas}}$ desse sistema ainda seria consideravelmente superior (21,97 R\$ m⁻³) ao FT, para a densidade de estradas de 13,82 m ha⁻¹. Isso retrata a superioridade do FT quando analisado o $CP_{\text{colheita+estradas}}$. Esses resultados são corroborados por outros trabalhos que compararam esses sistemas de colheita (ADEBAYO et al., 2007; SOUZA et al., 2018b).

Por outro lado, no cenário DOE, a distância média de extração do CTL seria de 430 m, ao passo que a do FT de 320 m. Portanto, numa condição ótima de densidade de estradas, o CTL poderia trabalhar à distâncias de extração 34% superiores ao FT, o que retrata a superioridade do mesmo para condições em que a densidade de malha viária florestal é restrita.

Há de se considerar que em densidades de estradas inferiores à DOE, ocorre aumento do $CP_{\text{colheita+estradas}}$ e maior propensão ao estrangulamento da produção em ambos os sistemas, pois a extração passa a ser o gargalo de produção e as áreas de

pátio para estocagem da madeira ficam mais restritas. Portanto, tal condição de trabalho não é recomendada, apesar da meta mínima de produção estipulada ser cumprida até valores inferiores à DOE (14,65 m ha⁻¹ e 10,10 m ha⁻¹ para FT e CTL, respectivamente).

Embora não analisados no presente estudo, aspectos relacionados à área de pátios florestais, rapidez para mudanças na produção dos sortimentos, controle de qualidade, versatilidade para operações de desbaste, impactos ambientais e aproveitamento da biomassa, também devem ser considerados na escolha do sistema de colheita a ser adotado.

Dessa forma, é importante ressaltar que, em condições restritivas de espaço nos pátios florestais, o CTL se sobressai em relação ao FT, pois, possibilita a formação de pilhas de toras com maiores alturas, o que implica na necessidade de menor área para estocar a madeira à margem da estrada (SYUNEV et al., 2009).

O atendimento de diversos clientes exige mudanças frequentes dos sortimentos produzidos. Nesse aspecto, o FT apresenta vantagem em relação ao CTL, pois, possibilita maior rapidez na troca dos sortimentos a serem produzidos, uma vez que a madeira é processada à margem da estrada. No CTL, essas trocas exigem planejamento prévio (em torno de dois dias) para o atendimento dos clientes, visto que a madeira é processada no talhão e extraída na forma de toras.

Entretanto, como há produção de diversos sortimentos com especificações a serem seguidas (por exemplo, medidas de comprimento e diâmetros e presença/ausência de nós), o CTL apresenta a vantagem de possibilitar que o controle de qualidade seja mais rigoroso, pois pode ser realizado previamente e posteriormente à extração da madeira. No caso do FT, há menor tempo para o controle de qualidade, visto que as toras são processadas à margem da estrada e, por vezes, transportadas rapidamente após o processamento.

O manejo florestal de longo prazo, comumente, exige desbastes tardios, nos quais são removidas árvores com maiores tamanhos, que fornecem fustes com maior valor de mercado. O CTL apresenta maior versatilidade para ser utilizado nessas operações, pois, apresenta a vantagem de reduzir os fustes em toras no interior do talhão, o que facilita a movimentação da madeira em meio às árvores que irão remanescer no povoamento (SPINELLI, 2004).

Em termos ambientais, o CTL contribui com a ciclagem de nutrientes (SPINELLI; MAGAGNOTTI, 2010) e acúmulo ou manutenção dos níveis de matéria

orgânica no solo (REICHERT et al., 2007), pois os resíduos da colheita (pequenas frações do fuste não aproveitadas, galhos e folhas) ficam espalhados ao longo de toda a área colhida. Ademais, esses resíduos auxiliam na distribuição do peso das máquinas utilizadas na extração, o que pode mitigar o aumento da resistência à penetração no solo (AMPOORTER et al., 2007).

Por outro lado, o sistema FT diminui os riscos de incêndios e possibilita o aproveitamento da biomassa que fica acumulada à margem da estrada após o processamento das árvores (MALINOVSKI et al., 2014). Além disso, diminui os custos posteriores com preparo da área, pois, deixa menor quantidade de resíduos quando comparado ao CTL. Portanto, a viabilidade econômica do uso da biomassa dos resíduos, a interface com a silvicultura e a maior ou menor necessidade de fertilização dos sítios florestais deverão ser considerados na escolha do sistema para cada situação particular.

4.6 CONCLUSÕES

Os resultados desse estudo confirmam as hipóteses inicialmente levantadas, no sentido que:

- Para a densidade atual de estradas (DAE), desconsiderando-se a condição de balanceamento do sistema, o custo com colheita do sistema de árvores inteiras (FT) representa 37,7% do obtido para o de toras curtas (CTL), devido à maior produtividade das máquinas no primeiro respectivo sistema.
- Considerando-se as simulações de densidade ótima de estradas (DOE) para a condição de balanceamento dos sistemas, o FT apresenta produtividade superior e custo total de produção com colheita e estradas ($CP_{\text{colheita+estradas}}$) equivalente a 51% daquele obtido para o CTL.
- Segundo as simulações, a adequação da DAE para a DOE resulta na diminuição de 40,5% e 31,3% no $CP_{\text{colheita+estradas}}$ dos sistemas FT e CTL, respectivamente.
- Na DOE, o CTL apresenta-se mais versátil para situações onde se dispõe de densidade de estradas restrita, necessitando de 74,5% da malha viária recomendada para o sistema FT.

5 CAPÍTULO 3 - DESEMPENHO E CUSTOS DE UM SISTEMA MECANIZADO DE TORAS CURTAS CONSIDERANDO DIFERENTES SORTIMENTOS

5.1 RESUMO

O sistema estudado no sul do Brasil consistia de um *harvester*, *forwarder* e carregador florestal. O estudo avaliou o desempenho e custos dessas máquinas, sob o efeito de diferentes volumes por tora. Para o *forwarder*, além disso, foram testados diferentes métodos de trabalho, englobando variações na distância de extração. Os métodos de trabalho avaliados foram: extração de, 1 sortimento por carga (T1), 2 sortimentos por carga (T2) e 3 ou mais sortimentos por carga (T3). Estudos de tempo ao nível de elemento do ciclo foram aplicados para avaliar a produtividade das máquinas no corte final de *Pinus taeda* em terreno plano. Regressões simples e múltiplas foram usadas para desenvolver equações de predição da produtividade. Adicionalmente, os custos de produção das máquinas e do sistema foram determinados. As produtividades médias do *harvester* e carregador foram, respectivamente, de 89,0 m³ PMH₀⁻¹ e 98,5 m³ PMH₀⁻¹. O *forwarder* apresentou valores médios de 40,8, 45,1 e 41,3 m³ PMH₀⁻¹ para T1, T2 e T3, respectivamente. Nas condições médias de estudo (volume por tora = 0,30 m³ e distância de extração = 120 m) os custos totais de produção do sistema foram de 15,39, 14,30 e 14,58 R\$ m⁻³, quando utilizado T1, T2 e T3 na extração, respectivamente. Entretanto, a análise de sensibilidade demonstrou que o T3 pode fornecer o custo total de produção mais atrativo quando o trabalho é realizado com menor volume por tora (0,15 m³) à distâncias de extração maiores que 130 m. As descobertas dessa pesquisa podem ser usadas no planejamento e melhoria da produtividade da colheita de madeira nesses povoamentos.

Palavras-chave: Estudo do trabalho. Técnicas e operações florestais. Variáveis do processo. Colheita de povoamentos de longa rotação.

5.2 ABSTRACT

The system studied in southern Brazil consists of a harvester, forwarder and loader. The study evaluated the performance and costs of these machines, under the effect of different log volumes. For the forwarder, in addition, different working methods were tested, including extraction distance variation. The working methods evaluated were

extraction of, 1 assortment per load (T1), 2 assortments per load (T2) and 3 or more assortments per load (T3). Elemental time studies were applied to evaluate the machines productivity in *Pinus taeda* final cutting, on flat ground. Simple and multiple regressions were used to develop productivity prediction equations. In addition, machines and system production costs were determined. The average harvester and loader productivities were, respectively, 89.0 m³ PMH₀⁻¹ and 98.5 m³ PMH₀⁻¹. The forwarder presented average values of 40.8, 45.1 and 41.3 m³ PMH₀⁻¹ for T1, T2 and T3, respectively. In average study conditions (log volume = 0.30 m³ and extraction distance = 120 m), the total system production costs were 15.39, 14.30 and 14.58 R\$ m⁻³, when used T1, T2 and T3 in the extraction, respectively. However, sensitivity analysis demonstrated that T3 could provide the most attractive total production cost when the work is performed with lower log volume (0.15 m³) to extraction distances greater than 130 m. These research findings can be used to planning and improve logging efficiency in these stands.

Keywords: Work study. Forestry techniques and operations. Process variables. Harvesting of long rotation stands.

5.3 INTRODUÇÃO

A colheita e o transporte florestal representam em torno de 60 a 70% dos custos totais da madeira oriunda de florestas plantadas no Brasil, sendo consideradas atividades fundamentais na definição dos custos da madeira para as fábricas transformadoras de produtos (MALINOVSKI et al., 2014). Na década de 90, a abertura do mercado brasileiro para a importação de máquinas florestais possibilitou, em prazos relativamente curtos, a redução da necessidade de mão-de-obra, o aumento da produtividade e a humanização do trabalho nas atividades de colheita de madeira (BRAMUCCI; SEIXAS, 2002). Atualmente, décadas após a abertura de mercado, essas atividades ainda passam por significativas inovações e avanços tecnológicos (NASCIMENTO et al., 2011).

Inserido nesse contexto, o uso de máquinas sofisticadas tem se tornado cada vez mais comum na colheita de povoamentos em empresas florestais no Brasil. O sistema mecanizado de toras curtas constituído por *harvester* (derrubada e processamento) e *forwarder* (extração), vem sendo o mais utilizado no país (SEIXAS; BATISTA, 2014) e em outros lugares do mundo (TIERNAN et al., 2004; GHAFARIAN

et al., 2012). No Brasil, combinado a esse sistema, é comum a utilização de carregadores florestais de esteiras para realização do carregamento das toras já extraídas em veículos de transporte principal.

No entanto, para operações de corte final de povoamentos manejados em longas rotações, existem diversas restrições que limitam o uso de máquinas no sistema de toras curtas. O reduzido número de árvores com elevados volumes individuais implica na necessidade da utilização de máquinas específicas, que sejam capazes de trabalhar nessas condições.

As condições de trabalho em operações de corte final de povoamentos em que esse tipo de manejo é adotado são, particularmente, mais difíceis em relação às praticadas em povoamentos de curta rotação, pois, há maiores riscos de segurança no trabalho, decorrente dos elevados pesos das árvores. Além disso, o elevado número de sortimentos produzidos e a frequente necessidade dessas operações serem realizadas 'a quente' (MALINOVSKI et al., 2014) tornam a questão de gargalos de produção dos sistemas e a dinâmica dessas operações mais complexas.

Estudos prévios têm mostrado que algumas variáveis relacionadas ao terreno, povoamento e à própria operação exercem influência no desempenho das máquinas usadas nesse sistema. A produtividade do *harvester* é influenciada pelo volume das árvores (STRANDGARD et al., 2013; WALSH; STRANDGARD, 2014; NORIHIRO et al., 2018), espécie (NURMINEM et al., 2006; NORIHIRO et al., 2018), forma das árvores (LABELLE et al., 2016), tipo de máquina (SPINELLI et al., 2010), operador (PURFÜST; ERLER, 2011) e declividade do terreno (SPINELLI et al., 2002).

Os principais determinantes do desempenho do *forwarder* são a distância de extração e o volume por carga (TIERNAN et al., 2004; SPINELLI et al., 2004; GHAFARIYAN et al., 2012; WALSH; STRANDGARD, 2014; STRANDGARD et al., 2017). Além da experiência do operador (TERVO et al., 2010), volume das toras (SOUZA et al., 2018b), declividade (TIERNAN et al., 2004), tamanho das pilhas de tora nos ramais de extração e volume de madeira total por unidade de área (NURMINEM et al., 2006), volume dos sortimentos em relação à distância nos ramais de extração (MANNER et al., 2013) e número de sortimentos por ciclo de trabalho (NURMINEM et al., 2006; MANNER et al., 2013). A produtividade do carregamento, por sua vez, é influenciada principalmente, pelo tamanho das toras carregadas nos veículos de transporte (DINIZ et al., 2018).

Tendo em vista, os mais diversos efeitos dessas variáveis no desempenho dos sistemas de colheita e a possibilidade de interação entre as mesmas, é imprescindível que dados sejam coletados e informações geradas para o suporte às tomadas de decisão, principalmente, em condições peculiares, como é o caso de povoamentos manejados a longo prazo. Com base nas informações geradas, decisões assertivas podem ser tomadas, o que pode melhorar o desempenho das máquinas e diminuir custos de produção relacionados à colheita dos povoamentos florestais. Deste modo, o presente estudo trabalha com duas hipóteses:

1. Povoamentos manejados em longas rotações possuem maiores volumes individuais das árvores, o que se reflete em toras com maiores dimensões. Isso gera maiores produtividades e menores custos nas operações de colheita florestal, uma vez que, o tempo necessário para cortar, extrair e carregar a madeira é menor em comparação às operações realizadas com árvores de menores dimensões.

2. O desempenho da extração tende a melhorar quando são extraídas cargas puras (apenas 1 sortimento) (KELLOGG; BETTINGER, 1994; NURMINEM et al., 2006), devido a maior facilidade de ordenação das toras e menor necessidade de deslocamentos para o 'descarregamento' no pátio intermediário. Esse método de trabalho gera menores custos unitários em relação à extração de cargas mistas (cargas com mais de 1 sortimento).

Portanto, o objetivo desse estudo foi avaliar o efeito das variáveis do processo e de diferentes métodos de trabalho na etapa extração, sobre o desempenho e custos de um sistema de toras curtas em operações de corte final de povoamentos de *Pinus taeda* L..

5.4 MATERIAL E MÉTODOS

5.4.1 Área de estudo

A pesquisa foi realizada em um plantio de *Pinus taeda* L. com 33 anos de idade localizado no município de Campo Belo do Sul, Santa Catarina, região sul do Brasil. Esse povoamento era de origem seminal e foi conduzido com 5 intervenções de desbaste e 3 podas (até 5,8 m de altura). No momento do estudo, a densidade

média era 250 árv. ha⁻¹. As médias do diâmetro à altura do peito e altura total foram 46,8 cm e 36,0 m, respectivamente. O volume médio individual era 2,71 m³ árv.⁻¹.

A densidade de estradas era de 66,7 m ha⁻¹, a qual remanesce das primeiras intervenções de desbaste utilizadas nesses povoamentos, pois, a extração era realizada por meio de tração animal, o que exigia maior densidade de malha viária. A condição do terreno era relativamente plana quando comparada à realidade local, com declividade média de 4,6°. A área apresentava predominância de cambissolo húmico, com consistência friável quando úmido e plástico/pegajoso quando encharcado. Contudo, a realização do estudo ocorreu no máximo em condições de solo úmido.

5.4.2 Estudo do trabalho e procedimento amostral

O sistema de toras curtas foi estudado em operações de corte final dos povoamentos. A derrubada e processamento das árvores era realizada no talhão por um *harvester* de marca John Deere modelo 909MH de esteiras equipado com cabeçote Waratah HTH624C, capaz de trabalhar com árvores de até 81 cm de diâmetro (FIGURA 15A). Essa máquina possuía sistema de tintas que marcava até três sortimentos no processamento e tinha 6.500 horas de trabalho.

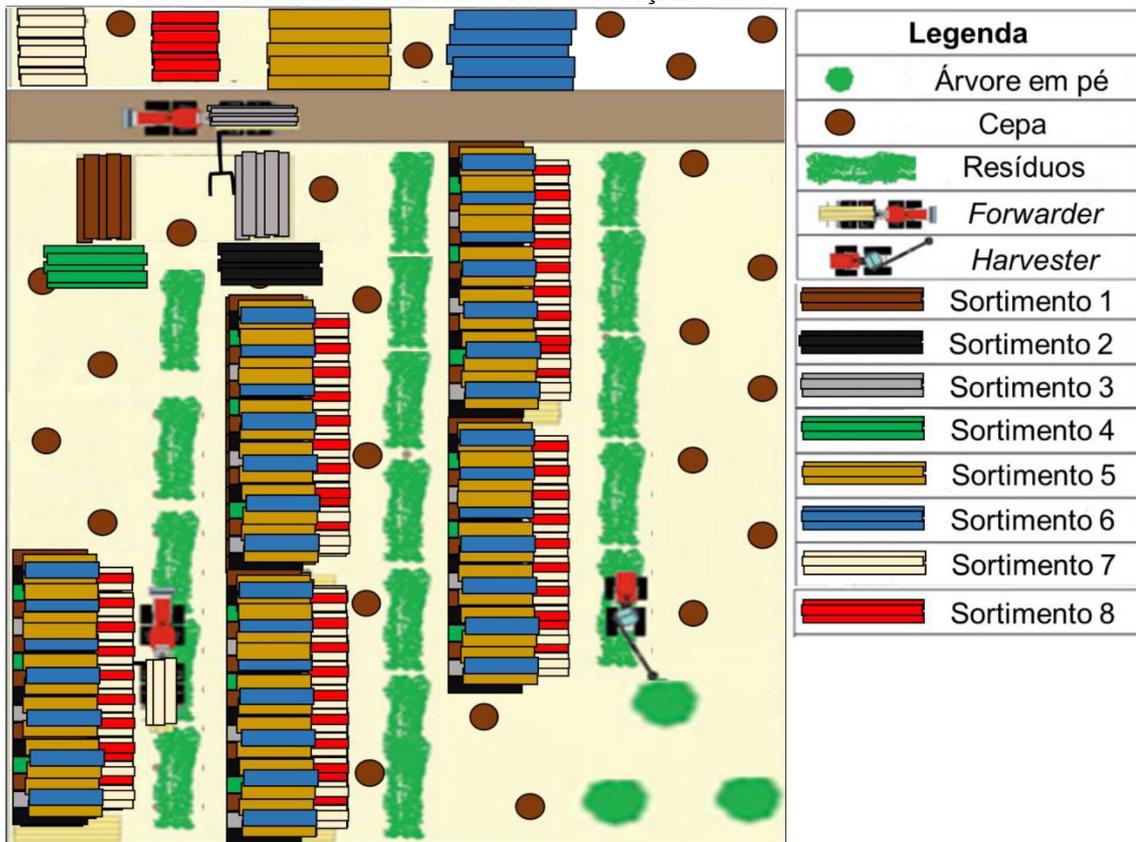
FIGURA 15 – MÁQUINAS DE COLHEITA UTILIZADAS NA ÁREA DE ESTUDO. A: HARVESTER, B: FORWARDER E C: CARREGADOR FLORESTAL.



FONTE: O autor (2019).

No processamento, as toras eram deixadas em diferentes posições em relação ao ramal de extração (FIGURA 16), para facilitar a posterior extração dos diferentes sortimentos.

FIGURA 16 – DESENHO ESQUEMÁTICO DA DISPOSIÇÃO DAS TORAS DEIXADAS PELO HARVESTER NOS RAMAIS DE EXTRAÇÃO E DAS PILHAS DOS SORTIMENTOS À MARGEM DA ESTRADA APÓS A EXTRAÇÃO.



FONTE: O autor (2019).

A extração da madeira para a margem da estrada foi efetuada por *forwarder* de marca John Deere modelo 1910E de pneus equipado com semi-esteiras dianteiras e traseiras, tração 8x8 e capacidade de carga de 19 toneladas (Figura 15B, p. 96). Ele tinha 5.600 horas de trabalho. Essa máquina deixava as toras em diferentes pilhas à margem da estrada, de acordo com as especificações dos sortimentos (FIGURA 16).

Em seguida, um carregador florestal da marca Hyundai modelo 220LC-95 equipado com grua da marca J de Souza, modelo GJ800-r (FIGURA 15C, p. 96) realizava o carregamento das toras nos veículos que transportavam a madeira até os clientes da empresa. A área da grua era de 0,8 m² e a abertura máxima de 240 cm. O carregador florestal apresentava 5.500 horas de trabalho.

A colheita era realizada ‘a quente’ (MALINOVSKI et al., 2014), com transporte das toras em, no máximo, 5 dias após o corte. O sistema produzia, simultaneamente, oito diferentes sortimentos com variações de comprimento (TABELA 18). Esses produtos eram classificados de acordo com o diâmetro na ponta fina e presença ou ausência de nós.

TABELA 18 – ESPECIFICAÇÕES DOS SORTIMENTOS PRODUZIDOS NA ÁREA DE ESTUDO.

Produto	Diâmetro mínimo na ponta fina (cm)	Diâmetro máximo na ponta fina (cm)	Comprimento (m)	Nós (P ou A)	Posição	Proporção do volume total por hectare (%)
1	>42	99	2,17 e 2,60	A	1°	8
2	35	42	2,15 e 2,60	A	1°	7
3	25	35	2,60	A	1° ou 2°	5
4	>35	99	2,60 e 3,08	A	2°	2
5	>35	99	2,60 e 3,06	P	> 2°	40
6	25	35	2,60; 3,06 e 4,15	P	> 2°	26
7	20	25	1,90 e 2,55	P	> 2°	4
8	8	18	1,40 a 2,40	P	> 2°	8

FONTE: O autor (2019).

Em que: P = presença; A = ausência; Posição: posição da tora na árvore (1° tora, 2° tora, >2°).

Coletas de tempo ao nível de elemento do ciclo de trabalho (MAGAGNOTTI e SPINELLI, 2012; ACKERMAN et al., 2014) foram realizadas para as fases de corte, extração e carregamento. Para a análise dessas fases, diferentes tipos de estudo de medição do trabalho foram conduzidos. O desempenho operacional das fases de corte e carregamento foram determinados por meio de estudos que utilizaram a abordagem de modelagem, ao passo que, para a extração foram utilizadas as abordagens experimental e de modelagem, conforme recomendado por Magagnotti e Spinelli (2012) e Ackerman et al. (2014).

Os tempos consumidos foram coletados em observações diretas a campo, com o uso do software *Time Motion Study* versão 2.3 em *tablet*. A identificação dos ciclos de trabalho, bem como, a aferição das co-variáveis coletadas foram anotadas em formulários específicos.

As coletas sempre foram realizadas, simultaneamente, por dois observadores. Um dos observadores era responsável pelas tomadas de tempo no *tablet*, enquanto, o outro realizava a medição das co-variáveis e identificava os ciclos de trabalho coletados no formulário. Esse procedimento teve como intuito facilitar as coletas à

campo e estabelecer uma medida de controle de qualidade na coleta dos dados, considerando que o observador pode ser uma fonte de viés nas observações (SPINELLI et al., 2013; STRANDGARD; MITCHELL, 2015).

5.4.2.1 Corte

Os elementos do ciclo de trabalho do *harvester* são apresentados na TABELA 19. Durante o estudo, dois operadores com nível semelhante de experiência (2 anos) trabalharam com essa máquina.

TABELA 19 – ELEMENTOS DO CICLO DE TRABALHO DO HARVESTER NA DERRUBADA E PROCESSAMENTO DE *Pinus taeda*.

Deslocamento:	inicia quando as esteiras começam a girar e termina quando elas param de se movimentar para o início do movimento do braço hidráulico.
Busca e derrubada:	começa quando o braço hidráulico do <i>harvester</i> inicia o movimento em direção à árvore a ser derrubada e termina quando o cabeçote pega a árvore derrubada do chão ou a máquina começa a executar outra atividade.
Processamento:	inicia quando o cabeçote pega a árvore já derrubada do chão e termina com o corte transversal da última tora da árvore ou a máquina começa a executar outra atividade.
Interrupções:	inicia quando a máquina para de realizar atividades relacionadas ao ciclo de trabalho e termina quando o trabalho recomeça.

FONTE: O autor (2019).

Nos povoamentos estudados, 135 árvores distribuídas aleatoriamente tiveram seus diâmetros à altura do peito (dap) e altura total (h) medidas. A medição cruzada do dap sobre a casca foi realizada utilizando uma suta com precisão de 0,1 cm. A altura total foi medida com o uso do hipsômetro Vertex™ com precisão de 0,1 m.

Juntamente com a medição, as árvores receberam um número único, com a finalidade de identificar cada uma delas no momento do registro dos tempos do ciclo de trabalho, e assim, possibilitar o pareamento dos dados. A numeração das árvores foi realizada com tinta vermelha no fuste das árvores, em um ângulo que possibilitasse a visualização à uma distância de 100 m. As árvores coletadas representaram toda a distribuição diamétrica dos povoamentos estudados.

Posteriormente, por meio de equação de afilamento ajustada pela empresa para povoamentos com mesma idade e características semelhantes, foram estimados os volumes comerciais (v_c), além do número e volume das toras geradas em cada árvore medida.

Esses dados também possibilitaram a estimativa do volume médio por tora e o estabelecimento de uma relação entre essa variável e o volume comercial de cada árvore. Essa medida foi tomada com vista à padronização das co-variáveis em relação às etapas de extração e carregamento, uma vez que, nesses casos, a variação da produtividade foi analisada em função do volume por tora.

5.4.2.2 Extração

A TABELA 20 mostra os elementos do ciclo de trabalho do *forwarder* analisados no presente estudo.

TABELA 20 – ELEMENTOS DO CICLO DE TRABALHO DO *FORWARDER* NA EXTRAÇÃO DE TORAS DE *Pinus taeda*.

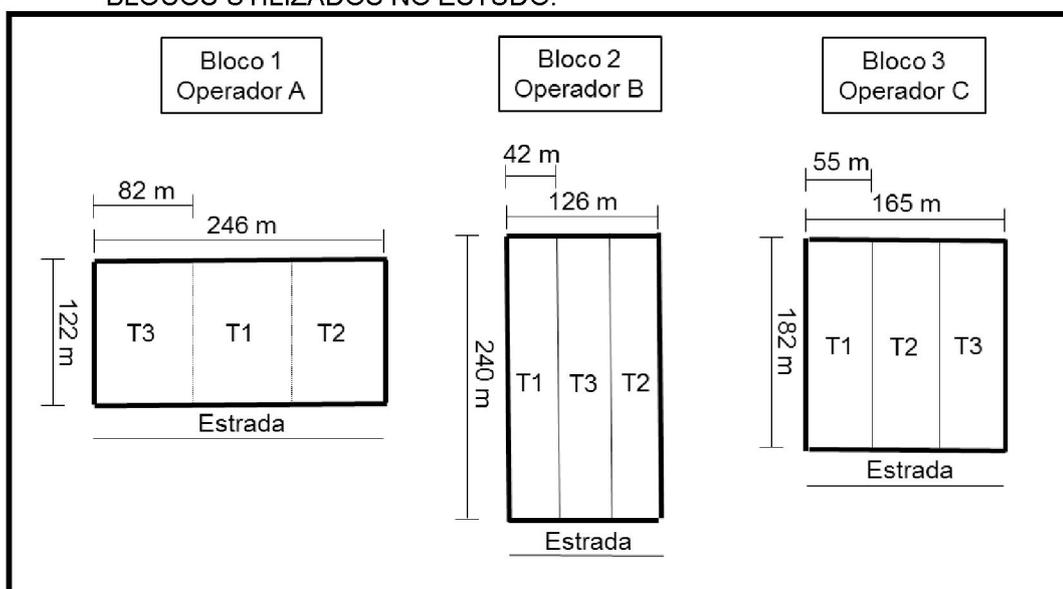
<p>Viagem vazio: começa quando o <i>forwarder</i> vazio começa a se deslocar para a área de colheita a partir da margem da estrada ou pátio intermediário e termina com o início do primeiro movimento do braço hidráulico para a coleta das toras nas 'pilhas' do ramal de extração.</p> <p>Carregamento: começa com o início do primeiro movimento do braço hidráulico para a coleta das toras nas 'pilhas' do ramal de extração e termina quando a viagem carregado para a margem da estrada ou pátio intermediário inicia (grua posicionada sobre a carga como procedimento de segurança).</p> <p>Viagem durante o carregamento: inclui o movimento do <i>forwarder</i> entre as 'pilhas' de toras ao longo do ramal de extração, sem o movimento do braço hidráulico. Inicia somente quando a máquina começa a se mover (rodas começam a girar) ao longo do ramal de extração para outras 'pilhas' de toras. Esse elemento termina quando o movimento do braço hidráulico inicia em uma nova 'pilha' de toras.</p> <p>Viagem carregado: começa quando a viagem para a margem da estrada ou pátio intermediário com uma carga completa ou concluída inicia e termina com o início do movimento do braço hidráulico para o descarregamento à margem da estrada ou pátio intermediário.</p> <p>Descarregamento: começa com o início do movimento do braço hidráulico para descarregar as toras do compartimento de carga do <i>forwarder</i> e termina com o posicionamento da grua no compartimento de carga da máquina após o término do descarregamento de todas as toras.</p> <p>Viagem durante o descarregamento: inclui o movimento do <i>forwarder</i> entre diferentes pilhas de toras à margem da estrada ou pátio intermediário. Inicia somente quando a máquina começa a se mover (rodas começam a girar) após parte das toras serem descarregadas na(s) pilha(s) à margem da estrada ou pátio intermediário e termina com o início do movimento do braço hidráulico para descarregamento das toras do compartimento de carga em outra(s) pilha(s) de toras.</p> <p>Interrupções: inicia quando a máquina para de realizar atividades relacionadas ao ciclo de trabalho e termina quando o trabalho recomeça.</p>

FONTE: O autor (2019).

Em vista ao elevado número de sortimentos produzidos na área de estudo, o método de trabalho do *forwarder* foi estudado como determinante do desempenho dessa máquina. Os tratamentos analisados no estudo foram: extração de apenas um sortimento por ciclo de trabalho (T1), extração de dois sortimentos por ciclo de trabalho (T2) e extração de três ou mais sortimentos por ciclo de trabalho (T3).

O delineamento experimental de blocos ao acaso foi utilizado para avaliar o efeito dos tratamentos. O efeito relacionado ao operador foi bloqueado, ou seja, em um mesmo bloco, somente um operador realizou o trabalho, seguindo a prescrição dos três tratamentos (FIGURA 17). A área total do estudo foi de 9 hectares. Assim, cada tratamento foi avaliado em três parcelas de 1 hectare.

FIGURA 17 – ESQUEMA ILUSTRATIVO DO DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E DIMENSÕES DOS BLOCOS UTILIZADOS NO ESTUDO.



FONTE: O autor (2019).

Em que: T1 = tratamento 1; T2 = tratamento 2 e T3 = tratamento 3.

Com a finalidade de isolar ao máximo os efeitos dos tratamentos testados, co-variáveis de difícil padronização em condições operacionais foram quantificadas. A distância de extração (DE) e a declividade foram aferidas para cada ciclo de trabalho da máquina, usando um TruPulse 200, com precisão de 0,3 m e 0,25°, respectivamente.

A distância de extração foi aferida no ponto mais longo alcançado pelo *forwarder* dentro do talhão durante todo o ciclo de trabalho, por ser uma variável de fácil obtenção para fins de planejamento. Essa variável sempre foi aferida perpendicularmente à estrada, na margem da qual era realizado o descarregamento

das toras em pilhas. A declividade foi determinada no ponto mais íngreme trafegado pela máquina durante o ciclo de trabalho.

O volume das toras (V_{tora}) foi obtido pela cubagem de 10 a 15 toras de cada sortimento em cada variação de comprimento. As medições e estimativas dos volumes foram realizadas pelo método de Smalian (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2014). Os comprimentos e diâmetros cruzados sobre a casca foram medidos nas duas extremidades das toras usando fita métrica, com precisão de 0,1 cm. Esse procedimento foi realizado em todas as parcelas estudadas e resultou na medição total de 1.218 toras.

O volume por ciclo de trabalho (V_{ciclo}) foi obtido pela multiplicação do número de toras extraídas de cada sortimento pelo respectivo volume por tora. O número de toras foi determinado pela contagem das toras de cada sortimento em cada ciclo de trabalho. Essa contagem considerou inclusive diferenças nos comprimentos de um mesmo sortimento.

5.4.2.3 Carregamento

Os elementos do ciclo de trabalho do carregador florestal são mostrados na TABELA 21.

TABELA 21 – ELEMENTOS DO CICLO DE TRABALHO DO CARREGADOR FLORESTAL NO CARREGAMENTO DE TORAS DE *Pinus taeda*.

Deslocamento da grua vazia: começa quando a grua se movimenta do compartimento de carga do veículo de transporte até a pilha de toras e termina quando a grua encosta nas toras da pilha.
Arrumação da carga na grua: começa quando a grua encosta nas toras da pilha e termina quando a grua carregada com as toras inicia o movimento em direção ao compartimento de carga do veículo de transporte.
Deslocamento da grua carregada: começa quando a grua carregada com as toras inicia o movimento da pilha de madeira até o compartimento de carga do veículo de transporte e termina quando as toras encostam no compartimento de carga do veículo de transporte ou nas toras já acomodadas no mesmo.
Arrumação da carga no veículo de transporte: começa quando as toras encostam no compartimento de carga do veículo de transporte ou nas toras já acomodadas no mesmo e termina com o início do movimento da grua vazia em direção à pilha de toras.
Interrupções: inicia quando a máquina para de realizar atividades relacionadas ao ciclo de trabalho e termina quando o trabalho recomeça.

FONTE: O autor (2019).

Durante o estudo, o trabalho com essa máquina foi realizado por apenas um operador. O volume por ciclo, assim como para o *forwarder*, foi obtido pela

multiplicação do número de toras pelo respectivo volume por tora de cada sortimento carregado. O número de toras foi obtido pela contagem das toras de cada sortimento em cada ciclo de trabalho realizado.

5.4.2.4 Análise dos dados

Os tempos consumidos nos elementos do ciclo de trabalho ($s\ m^{-3}$) das máquinas foram obtidos pela razão entre o tempo consumido em cada etapa (s) e o volume por ciclo (m^3). No caso do *harvester*, o volume por ciclo foi igual ao volume comercial de cada árvore derrubada e processada.

A produtividade (P_{PMH}) das máquinas foi calculada pela Expressão 2. A unidade de medida utilizada no estudo para essa variável ($m^3\ PMH_0^{-1}$) se refere a produção das máquinas (m^3) a cada hora-máquina produtiva livre de interrupções (PMH_0^{-1}).

$$P_{PMH} = \frac{3600 * V_{ciclo}}{T_t} \quad (\text{Expressão 2})$$

Em que: P_{PMH} = produtividade por hora-máquina produtiva ($m^3\ PMH_0^{-1}$); V_{ciclo} = volume por ciclo (m^3); T_t = tempo total do ciclo de trabalho livre de interrupções (s).

Previamente às análises, foi realizada a identificação e exclusão de *outliers*, conforme critérios citados por Tukey (1977). Nessa etapa também foi realizada uma análise exploratória dos dados, com vistas à padronização da amplitude das principais variáveis influentes no desempenho do *forwarder*, conforme recomendado por Magagnotti e Spinelli (2012). Essa medida teve como objetivo isolar ao máximo os efeitos dos tratamentos testados, sem que as “variáveis incômodas” e co-variáveis pudessem mascarar os efeitos dos tratamentos.

Os pressupostos de normalidade e homogeneidade de variâncias dos resíduos da variável produtividade foram testados por meio dos testes de Kolmogorov-smirnov e Bartlett ($p > 0,05$), respectivamente. Quando necessário, transformações matemáticas foram aplicadas na variável de interesse para o atendimento dos pressupostos supracitados.

O erro de amostragem relativo (Expressão 3) foi determinado considerando a produtividade das máquinas, conforme Murphy (2005).

$$E = \frac{t * \sqrt{\sigma^2} * 100}{\sqrt{n} * \bar{x}} \quad (\text{Expressão 3})$$

Em que: E = erro de amostragem relativo (%); t = t de Student para o nível de 5% de significância; σ^2 = variância da produtividade ($\text{m}^3 \text{PMH}_0^{-1}$)²; n = número de ciclos de trabalho coletados; \bar{x} = média da produtividade ($\text{m}^3 \text{PMH}_0^{-1}$).

Estatística descritiva foi usada por meio de medidas de tendência central (média) e dispersão (erro padrão da média, coeficiente de variação e amplitude) para descrever os tempos consumidos nos elementos do ciclo de trabalho, produtividades e co-variáveis de todas as máquinas analisadas. Ademais, análise de correlação de Pearson (r) foi usada para a verificação de relações entre variáveis.

Para o *forwarder*, a influência dos blocos, tratamentos e das co-variáveis sobre os tempos consumidos nos elementos do ciclo de trabalho e produtividade foram testados por meio de modelagem linear generalizada para um nível de significância de 5%, conforme Ampoorter et al. (2010). O efeito dos blocos foi testado com o intuito de detectar discrepâncias entre as repetições de um mesmo tratamento, devido à possíveis variações de maior magnitude nas co-variáveis de alguma das parcelas.

Os efeitos dos blocos, tratamentos e operadores na produtividade do *forwarder* foram considerados fixos, ao passo que as demais co-variáveis foram consideradas de efeito aleatório (distância de extração, declividade, volume comercial, volume por ciclo e volume por tora).

A mesma análise foi utilizada para o *harvester*, considerando o efeito dos operadores como fixo e o do volume comercial e volume médio por tora como aleatórios. No caso do carregador florestal, somente o efeito do volume por tora foi avaliado.

De acordo com o número de variáveis independentes (co-variáveis) significativas pela modelagem linear generalizada ($p < 0,05$), análises de regressão simples e múltipla ($p < 0,05$) foram conduzidas, com o objetivo de estimar a produtividade das máquinas.

A produtividade do *harvester* foi estimada em função do volume comercial e volume médio por tora de cada árvore. Para o carregador florestal, o volume por tora foi usado como variável independente na estimativa da produtividade. No caso do *forwarder*, a produtividade foi modelada separadamente para cada tratamento estudado (T1, T2 e T3), em função do volume por tora e distância de extração. Esse

procedimento visou contornar as variações dessas co-variáveis entre as parcelas em que os diferentes tratamentos foram aplicados.

As equações ajustadas foram avaliadas por meio do coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$), erro padrão da estimativa absoluto (Sy_x), erro padrão da estimativa relativo ($Sy_x\%$), valor F e análise gráfica dos resíduos.

5.4.3 Custos

Os custos operacionais horários e de produção das máquinas foram determinados por meio da metodologia proposta por Miyata (1980). Os pressupostos considerados na estimativa dos custos operacionais horários são apresentados na TABELA 22.

TABELA 22 – PRESSUPOSTOS ASSUMIDOS PARA O CÁLCULO DO CUSTO OPERACIONAL HORÁRIO DAS MÁQUINAS ESTUDADAS.

Pressupostos	<i>Harvester</i>		<i>Forwarder</i>	Carregador florestal
	Mb	Impl.		
Valor de aquisição (R\$)	1.804.860	692.640	1.365.275	275.000
Valor de revenda (%)	20	5	20	20
Vida útil (PMH ₀)	20.000	12.000	20.000	16.000
Número de turnos (turnos dia ⁻¹)	2		2	1
Utilização (SMH ano ⁻¹)	4.646		4.646	2.323
Taxa de utilização (%)	75		80	60
Pessoal operacional (n)	2,2		2,2	1,1
Mão de obra (R\$ SMH ⁻¹)	35,44		29,33	29,10
Taxa de juros e seguros (%)	4		4	4
Manutenção (% depreciação)	75		70	60
Consumo específico (L PMH ⁻¹)	34,7		17,0	14,3
Preço do óleo diesel (R\$ L ⁻¹)	3,24		3,24	3,24
Óleo lubrificante e hidráulico (% do custo com combustível)	10		10	35
Preço de pneu/esteira (R\$)	100.000		12.000	70.000
Vida útil pneu/esteira (PMH)	12.000		10.000	7.000

FONTE: O autor (2019).

Legenda: Mb = máquina base; Impl. = implemento.

O *harvester* e o *forwarder* trabalhavam 2 turnos por dia (4.646 SMH ano⁻¹), ao passo que, o carregador florestal trabalhava 1 turno por dia (2.323 SMH ano⁻¹) (TABELA 22). As taxas de utilização (TU) foram informadas pela empresa, a qual

realiza coletas de dados ao nível de turno, por meio de formulários preenchidos pelos operadores para controle de interrupções com mais de 10 minutos de duração. Todos os demais dados e taxas utilizadas (TABELA 22) também foram obtidos com a empresa ou determinados à campo e são referentes ao período de novembro de 2018.

Os custos de produção (R\$ m⁻³) foram obtidos pela razão entre o custo operacional horário (R\$ SMH⁻¹) e a produtividade por hora-máquina programada (P_{SMH}, m³ SMH⁻¹) de cada máquina. O custo total de produção do sistema (CP_{CTL}) foi obtido pela soma dos custos de produção do *harvester*, *forwarder* e carregador florestal. Por fim, análise de sensibilidade do custo total de produção do sistema foi realizada em função de variações no volume por tora, distância de extração e método de trabalho do *forwarder* (T1, T2 e T3).

5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.5.1 Desempenho operacional

5.5.1.1 Corte

Os volumes comerciais das árvores colhidas pelo *harvester* foram altamente variáveis (TABELA 23), como reflexo da origem seminal dos povoamentos e denota que a amostragem foi realizada em todas as classes diamétricas da floresta. Os erros de amostragem considerando a variável produtividade foram de 4,9%.

TABELA 23 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA E TEMPOS CONSUMIDOS NOS ELEMENTOS DO CICLO DE TRABALHO DO *HARVESTER* NA DERRUBADA E PROCESSAMENTO DE *Pinus taeda*.

Duração do estudo (SMH)	6,0	P _{PMH} , média (SE) (m ³ PMH ₀ ⁻¹)	89,0 (2,2)
Duração das observações válidas (PMH ₀)	4,1	Erro de amostragem relativo, %	4,9
Número de observações válidas (ciclos)	135	v _c , amplitude (m ³ árv. ⁻¹)	0,8 - 7,6
Deslocamento, média (SE) (s m ⁻³)	2,9 (0,3)	v _c , média (SE) (m ³ árv. ⁻¹)	2,7 (2,2)
Busca e derrubada, média (SE) (s m ⁻³)	12,1 (0,5)	V _{tora} , amplitude (m ³ tora ⁻¹)	0,19 - 1,27
Processamento, média (SE) (s m ⁻³)	29,1 (0,8)	V _{tora} , média (SE) (m ³ tora ⁻¹)	0,46 (0,01)
P _{PMH} , amplitude (m ³ PMH ₀ ⁻¹)	43,4 - 215,0	Volume total produzido no estudo, m ³	372,1

FONTE: O autor (2019).

Em que: SMH = hora-máquina programada; PMH₀: hora-máquina produtiva livre de interrupções; SE: erro padrão da média; P_{PMH}: produtividade por hora-máquina produtiva; v_c: volume comercial; V_{tora}: volume por tora.

O 'processamento' foi a etapa do ciclo de trabalho do *harvester* que mais despendeu tempo (66%), seguido da 'busca e derrubada' (27,5%) e 'deslocamento' (6,5%) (TABELA 23). Esses resultados se assemelham aos de Walsh e Strandgard (2014), que reportaram distribuição do ciclo de trabalho semelhante (processamento = 65,2%; outros elementos = 34,8%), ao estudarem o desempenho de um *harvester* Timbco 475 com cabeçote Rosin 997, em condições similares de povoamento (volume médio individual = 2,53 m³ árv.⁻¹).

O 'deslocamento' foi o elemento que apresentou maior variabilidade nos tempos consumidos (coeficiente de variação = 109%). Essa etapa do ciclo de trabalho nem sempre ocorreu na derrubada e processamento das árvores, pois em determinadas condições a máquina não precisou se deslocar para realizar essas atividades. Em torno de 19% dos ciclos de trabalho analisados não apresentaram a ocorrência de deslocamentos, o que contribuiu para o aumento da variabilidade dos dados. Outro fator que pode ter influenciado foi a presença de rochas e/ou obstáculos superficiais (STRANDGARD et al., 2013). Contudo, esse não foi um fator analisado no estudo.

A variabilidade dos tempos em 'busca e derrubada' (coeficiente de variação = 46%) possivelmente está relacionada à diferentes técnicas utilizadas pelos operadores analisados no estudo. A modelagem linear generalizada evidenciou haver diferenças nos tempos consumidos nessa etapa para os diferentes operadores (TABELA 24), o que fortalece essa afirmação.

TABELA 24 – INFLUÊNCIA DO VOLUME COMERCIAL (v_c) E OPERADORES NA PRODUTIVIDADE E TEMPOS CONSUMIDOS NOS ELEMENTOS DO CICLO DE TRABALHO DO *HARVESTER* PELA MODELAGEM LINEAR GENERALIZADA.

Fatores	v_c	Operador
Deslocamento	<0,01	0,51
Busca e derrubada	<0,01	0,04
Processamento	<0,01	0,18
P _{PMH}	<0,01	0,54

FONTE: O autor (2019).

Legenda: valores em negrito são significativos ao nível de 5% de probabilidade.

Além disso, árvores com menores volumes foram derrubadas com apenas um corte, ao passo que, para árvores de maiores dimensões, era realizado um corte adicional do lado contrário do tronco (STRANDGARD et al., 2013) para evitar danos à base do fuste no momento da queda. O corte adicional gerou maior dispêndio de

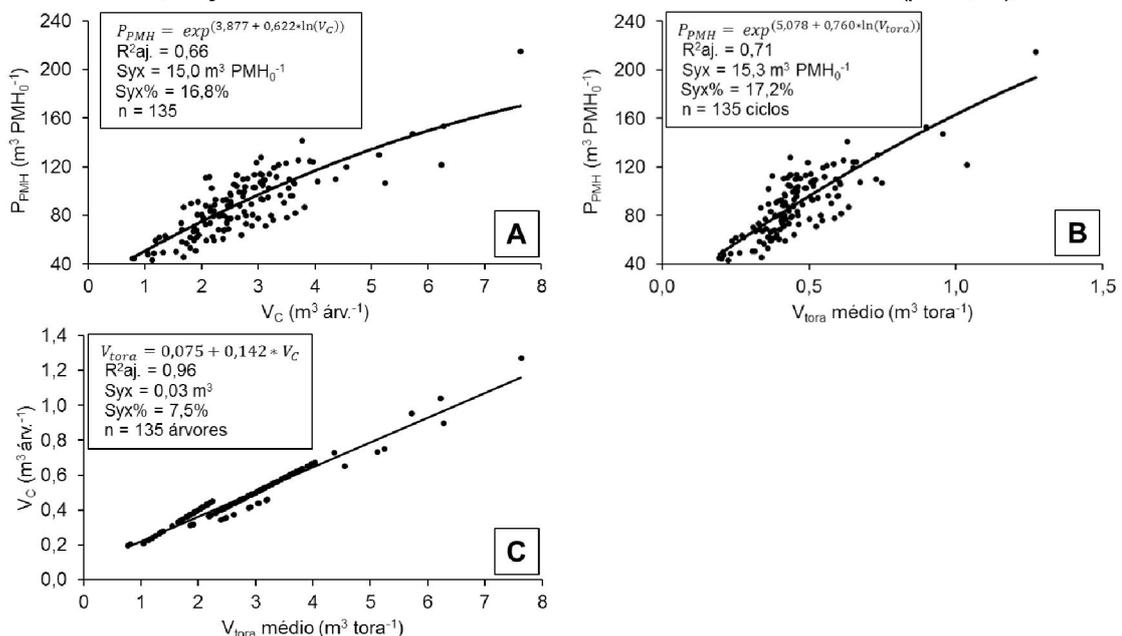
tempo nessa atividade, decorrente da necessidade de mudança de posição do cabeçote para o segundo corte, o que também contribuiu para o aumento da variabilidade dos dados.

O ‘processamento’ foi a etapa do ciclo de trabalho com menor variabilidade. Ainda assim, o valor do coeficiente de variação pode ser considerado elevado (32%). Essa variação foi decorrente de tempos adicionais necessários para a remoção de galhos mais grossos, bem como, para redefinir a medição do comprimento das toras, cortando um disco estreito na extremidade do fuste (STRANDGARD et al., 2013). Essas atividades não ocorreram de forma padronizada para todas as árvores, portanto, podem ser consideradas importantes fontes de variação dos dados.

Os diferentes operadores analisados durante o estudo não exerceram influência significativa na produtividade do *harvester* (TABELA 24, p. 107), por apresentarem nível de experiência semelhante. Portanto, a modelagem da produtividade dessa máquina foi realizada sem considerar agrupamento dos dados relacionado ao fator operador.

A relação entre o volume comercial e o volume médio por tora das árvores é mostrada na FIGURA 18C. A produtividade do *harvester* foi dependente do volume comercial (FIGURA 18A) e volume médio por tora (FIGURA 18B) das árvores.

FIGURA 18 – VARIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DO *HARVESTER* EM FUNÇÃO DO VOLUME COMERCIAL (A) E VOLUME MÉDIO POR TORA DAS ÁRVORES (B). RELAÇÃO ENTRE O VOLUME COMERCIAL E VOLUME MÉDIO POR TORA DAS ÁRVORES (C). EQUAÇÕES SIGNIFICATIVAS PELA ANÁLISE DE VARIÂNCIA ($p < 0,01$).



FONTE: O autor (2019).

Esses resultados são corroborados por outros autores que relataram a influência do volume total/comercial das árvores no desempenho do *harvester* em condições semelhantes de povoamento (volumes individuais = 0,5 a 4,0 m³ árv.⁻¹) (GHAFFARIYAN et al., 2012; STRANDGARD et al., 2013; WALSH & STRANDGARD, 2014).

Para a amplitude de volumes comerciais estudada, a produtividade estimada pela equação variou de 41,9 a 173,1 m³ PMH₀⁻¹ (FIGURA 18A, p. 108), ao passo que considerando-se como variável independente o volume médio por tora, os valores estimados variaram de 47,0 a 195,4 m³ PMH₀⁻¹ (FIGURA 18B, p. 108).

A produtividade média do *harvester* foi 89,0 m³ PMH₀⁻¹. Esse valor é menor aos reportados por Strandgard et al. (2013) (135,7 m³ PMH₀⁻¹ e 164 m³ PMH₀⁻¹) e Walsh e Strandgard (2014) (93 t PMH₀⁻¹), que estudaram o desempenho de um *harvester* Timbco 475 com cabeçote Rosin 997, na derrubada e processamento de povoamentos de *Pinus radiata* na Austrália com tamanhos de árvores semelhantes ao presente estudo.

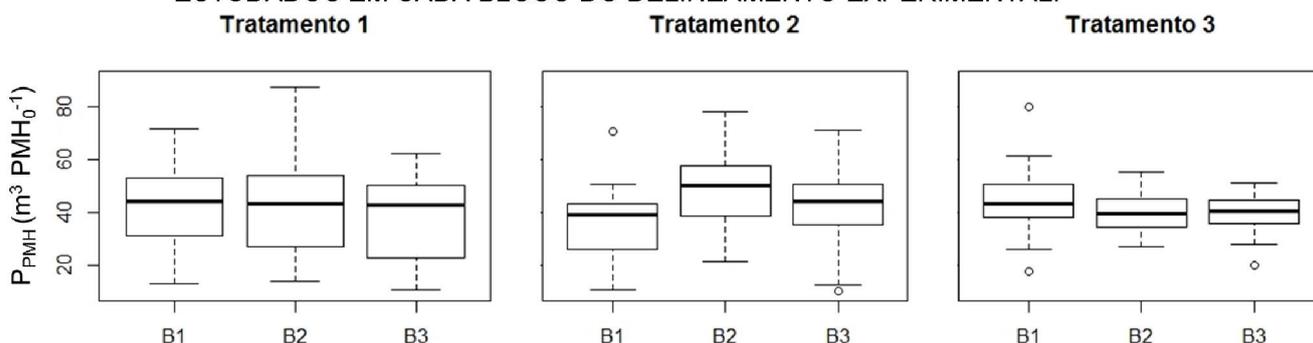
Essas diferenças podem ser atribuídas a possíveis variações no comprimento das toras produzidas nos estudos. Na pesquisa realizada por Walsh e Strandgard (2014), as toras tiveram variação de 3,7 a 6,1 m, ao passo que, nesse estudo, o comprimento variou de 1,9 a 4,15 m. Dessa forma, a produtividade foi menor no presente estudo, em decorrência do maior consumo de tempo no processamento das árvores, devido ao menor comprimento das toras. Além disso, essas diferenças podem estar relacionadas ao operador. Alam et al. (2014) identificaram a técnica utilizada pelo operador como a principal causa de menores produtividades dessa máquina.

5.5.1.2 Extração

A modelagem linear generalizada evidenciou diferença altamente significativa na produtividade do *forwarder* entre as parcelas em que o T2 foi aplicado ($p < 0,01$). Em análise exploratória aprofundada, essa diferença foi atribuída às características de uma dessas parcelas (tratamento 2 no bloco 1) (FIGURA 19), na qual havia presença de inclinação do terreno maior que 15° associada a afloramento rochoso na camada superficial do solo. Além disso, esse local apresentava outra tipologia de solo

(Organossolo háplico) com afloramento do lençol freático devido à proximidade de um banhado.

FIGURA 19 – BOXPLOTS DA PRODUTIVIDADE DO *FORWARDER* NOS TRATAMENTOS ESTUDADOS EM CADA BLOCO DO DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.



FONTE: O autor (2019).

Legenda: B1 = bloco 1; B2 = bloco 2 e B3 = bloco 3.

Devido essas características houve necessidade de alterações na dinâmica de trabalho, impondo maior dificuldade ao tráfego da máquina. Portanto, os dados dessa parcela foram desconsiderados das análises, uma vez que a variável de interesse apresentou viés relacionado às condições do terreno, não refletindo puramente o efeito do tratamento. Contudo, mesmo com a adoção dessa medida, houve suficiência amostral para todos os tratamentos, com erros de amostragem inferiores a 7% (TABELA 25, p. 111).

Após exclusão dos *outliers*, verificou-se que os tratamentos exerceram influência significativa no consumo de tempo de todos os elementos do ciclo de trabalho do *forwarder*, exceto na 'viagem vazio' e 'viagem carregado' (TABELA 26, p. 112).

As viagens 'vazio' e 'carregado' foram influenciadas pela distância de extração e volume por ciclo (TABELA 26, p. 112). Os tempos despendidos tiveram correlação positiva com a distância de extração ($r = 0,40$ e $0,42$, respectivamente; $p < 0,01$) e negativa com o volume por ciclo ($r = -0,53$ e $-0,44$, respectivamente; $p < 0,01$).

Portanto, o consumo de tempo nessas etapas aumentou à medida que as distâncias de extração foram maiores e os volumes por ciclo menores. Esses resultados são corroborados por Nurminem et al. (2006) e Strandgard et al. (2017) que relataram a mesma influência dessas variáveis nesses elementos do ciclo de trabalho do *forwarder*.

TABELA 25 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA E TEMPOS CONSUMIDOS NOS ELEMENTOS DO CICLO DE TRABALHO DO *FORWARDER* PARA OS TRATAMENTOS ESTUDADOS NA EXTRAÇÃO DE TORAS DE *Pinus taeda*.

Tratamento	1	2	3
Duração do estudo, SMH	54,8	61,6	61,6
Duração das observações válidas, PMH ₀	47,0	35,7	54,6
Número de observações válidas, ciclos	150	90	133
Erro de amostragem relativo, %	6,24	6,59	3,53
Tempo médio do elemento (SE), s m ⁻³			
Viagem vazio	13,2 (1,1)	7,8 (0,5)	7,1 (0,4)
Carregamento	41,9 (2,1)	38,7 (3,0)	35,0 (1,0)
Viagem durante o carregamento	12,5 (1,0)	7,3 (0,7)	5,6 (0,4)
Viagem carregado	10,4 (0,8)	8,8 (0,5)	7,3 (0,4)
Descarregamento	29,9 (1,0)	30,8 (1,3)	33,2 (0,4)
Viagem durante o descarregamento	0,05 (0,02)	0,5 (0,2)	2,8 (0,2)
V _{tora} - média, m ³	0,34	0,32	0,28
V _{tora} - amplitude, m ³	0,07 - 0,59	0,08 - 0,54	0,09 - 0,59
V _{ciclo} - média, m ³	12,4	17,0	16,5
V _{ciclo} - amplitude, m ³	2,0 - 24,5	5,1 - 24,3	4,3 - 23,7
DE - média, m	120,1	131,0	108,1
DE - amplitude, m	10 - 240	15 - 240	10 - 240
P _{PMH} - média, m ³ PMH ₀ ⁻¹	40,8	45,1	41,3
P _{PMH} - amplitude, m ³ PMH ₀ ⁻¹	11,4 - 87,1	10,3 - 78,2	18,0 - 80,0
Declividade, média (°)	4,8	4,2	4,9
Declividade, amplitude (°)	0 - 11,8	0,2 - 10,6	0 - 11,0

FONTE: O autor (2019).

Legenda: SMH = hora-máquina programada; PMH₀: hora-máquina produtiva livre de interrupções; SE: erro padrão da média; V_{tora}: volume por tora; V_{ciclo}: volume por ciclo; DE: distância de extração; P_{PMH}: produtividade por hora-máquina produtiva.

Adicionalmente, a ‘viagem vazio’ se mostrou influenciada pela declividade (TABELA 26, p. 112). No entanto, não houve correlação significativa entre essas variáveis ($r = 0,10$; $p = 0,06$). Isso denota que o efeito da declividade nesses elementos pode ser considerado secundário quando comparado aos da distância de extração e volume por ciclo.

O ‘carregamento’ foi a etapa que mais consumiu tempo no ciclo de trabalho do *forwarder* (T1 = 39%; T2 = 41%; T3 = 38%), o que confirma os achados de autores que estudaram essa máquina em outros países (SPINELLI et al., 2004; GHAFFARIYAN et al., 2012; WALSH & STRANDGARD, 2014; STRANDGARD et al., 2017). Essa etapa foi influenciada pelos tratamentos, distância de extração, volume por tora e volume por ciclo (TABELA 26, p. 112) e apresentou tendência de diminuição nos tempos consumidos à medida que um maior número de sortimentos foi extraído em uma mesma carga (TABELA 25).

TABELA 26 – INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS, DISTÂNCIA DE EXTRAÇÃO (DE), DECLIVIDADE, VOLUME POR TORA (V_{tora}) E VOLUME POR CICLO (V_{ciclo}) NA PRODUTIVIDADE (P_{PMH}) E CONSUMOS DE TEMPO NOS ELEMENTOS DO CICLO DE TRABALHO DO FORWARDER PELA MODELAGEM LINEAR GENERALIZADA.

Fator	Elementos do ciclo (s m ⁻³)						P_{PMH}
	VV	CR	VDC	VC	DC	VDD	
Tratamento	0,29	<0,01	<0,01	0,49	<0,01	<0,01	<0,01
DE (m)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,38	0,08	<0,01
Declividade (°)	0,02	0,23	0,38	0,65	0,74	0,06	0,12
V_{tora} (m ³ tora ⁻¹)	0,21	<0,01	<0,01	0,33	<0,01	0,23	<0,01
V_{ciclo} (m ³ ciclo ⁻¹)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	<0,01

FONTE: O autor (2019).

Em que: VV = viagem vazio; CR = carregamento; VDC = viagem durante o carregamento; VC = viagem carregado; DC = descarregamento; VDD = viagem durante o descarregamento. Valores significativos ($p < 0,05$) são apresentados em negrito.

Esse comportamento está associado ao volume de cada sortimento por unidade de área. Nurminen et al. (2006) relataram que sortimentos com menor volume de toras por hectare tiveram maiores tempos de carregamento, já que menos toras estavam disponíveis em cada parada de carga. No presente estudo, os efeitos das diferenças de volume por hectare de cada sortimento se refletiram em um menor volume médio por ciclo para o T1 em relação aos demais tratamentos (TABELA 25, p. 111).

Quando comparado aos demais tratamentos, o T1 também apresentou maior variabilidade nos volumes por ciclo (TABELA 25, p. 111). Essa variabilidade foi decorrente da extensão relativamente pequena dos ramais de extração (120 a 240 m), o que por vezes, não permitiu o preenchimento completo do compartimento de carga do *forwarder*, devido a insuficiência no número de toras do sortimento a ser extraído no ramal de extração. Isso ocorreu, sobretudo, em cargas de finalização dos ramais de extração.

Contudo, o volume por tora pode ser apontado como o principal fator de influência na etapa de 'carregamento'. Nurminen et al. (2006) e Strandgard et al. (2017) relatam maiores consumos de tempo para o carregamento de toras de menor volume. O presente estudo apoia esses resultados, pois, os tempos consumidos nessa etapa apresentaram correlação negativa ($r = -0,62$; $p < 0,01$) com o volume por tora.

Apesar de significativa na modelagem linear generalizada (TABELA 26, p. 112), a distância de extração apresentou correlação positiva fraca (SANTOS, 2007) com os consumos de tempo no 'carregamento' ($r = 0,20$; $p < 0,01$). Isso denota, que

possivelmente, seus efeitos estejam refletindo variações de outros fatores e podem ser considerados secundários quando comparados aos efeitos dos tratamentos, volume por tora e volume por ciclo, os quais foram mais importantes.

A 'viagem durante o carregamento' foi influenciada pelos tratamentos, distância de extração, volume por tora e volume por ciclo (TABELA 26, p. 112). Os tempos consumidos nessa etapa aumentaram à medida que um menor número de sortimentos foi extraído por carga (TABELA 25, p. 111).

Estudos anteriores apontam que o consumo de tempo nessa etapa do ciclo de trabalho tem relação com a distância a ser percorrida no carregamento, que por sua vez, é dependente da concentração de toras ao longo do ramal de extração (NURMINEN et al., 2006; MANNER et al., 2013). Entretanto, a exemplo do estudo realizado por Strandgard et al. (2017), a concentração de toras nos ramais de extração não foi determinada nesse estudo.

No entanto, seis dos oito sortimentos produzidos durante o estudo possuíam baixos volumes por hectare (cada um com menos de 8% do volume total) (TABELA 18, p. 98). Por isso, é possível inferir que esses sortimentos tiveram menores concentrações de toras no ramal de extração em relação aos outros dois sortimentos (sortimentos 5 e 6), que representaram cerca de 66% do volume total por hectare.

Dessa forma, quando a extração desses sortimentos foi realizada em cargas puras (T1), houve a necessidade de um maior número de deslocamentos para o preenchimento do compartimento de carga. Isso gerou maior consumo de tempo em 'viagem durante o carregamento' nesse tratamento quando comparado aos demais.

A influência dos volumes por tora ($r = -0,34$; $p < 0,01$) e por ciclo ($r = -0,59$; $p < 0,01$) nessa etapa do ciclo de trabalho também é reflexo da quantidade e distribuição das toras no ramal de extração. Nesse caso, toras maiores (diâmetro acima de 25 cm na ponta fina) representaram 88% do volume total por hectare, ao passo que, toras com menos de 25 cm de diâmetro na ponta fina, apenas 12% (TABELA 18, p. 98).

Assim, a extração de toras menores despendeu maior tempo nesse elemento do ciclo de trabalho, pois, ficavam mais esparsas ao longo do ramal de extração. No mesmo contexto, a ocupação do compartimento de carga foi menor quando esses sortimentos foram extraídos (SEIXAS; CASTRO, 2014), o que se refletiu em menores volumes por ciclo e, por consequência, maiores tempos consumidos nessa etapa.

O ‘descarregamento’ foi dependente dos tratamentos, volume por tora e volume por ciclo (TABELA 26, p. 112). O consumo de tempo médio nessa etapa foi menor no T1 (29,9 s m⁻³), quando comparado ao T2 e T3 (30,8 s m⁻³ e 33,2 s m⁻³, respectivamente).

Esses resultados são corroborados por Nurminen et al. (2006) e Manner et al. (2013), que reportaram essa mesma tendência em seus estudos. Em contrapartida, Strandgard et al. (2017) não encontraram diferenças nos tempos consumidos nessa etapa quando cargas mistas e puras de sortimentos foram extraídas, sob a justificativa de que os sortimentos eram trazidos separadamente no compartimento de carga do *forwarder*.

Diferentemente, no presente estudo não houve padronização com relação à separação dos sortimentos no compartimento de carga quando cargas mistas foram extraídas (T2 e T3). Portanto, parece lógico que o consumo de tempo tenha sido maior para cargas mistas, nas quais houve maior dificuldade para a triagem dos diferentes sortimentos no ‘descarregamento’.

Mesmo havendo efeito dos tratamentos no “descarregamento”, o principal fator influente nessa etapa foi o volume por tora ($r = -0,65$; $p < 0,01$), assim como para a fase de ‘carregamento’. Esse comportamento é explicado pelo maior consumo de tempo para o descarregamento de toras com menores volumes (NURMINEN et al. 2006). Além disso, a correlação negativa entre volume por ciclo e os tempos consumidos nessa etapa ($r = -0,40$; $p < 0,01$), provavelmente são reflexo do efeito do volume por tora. Nesse caso, cargas puras (T1) tiveram menores volumes por ciclo quando compostas pelos menores sortimentos. O mesmo ocorria quando cargas mistas possuíam maior representatividade dos menores sortimentos (STRANDGARD et al., 2017).

A ‘viagem durante o descarregamento’ também apresentou dependência dos tratamentos testados (TABELA 26, p. 112). O T3 apresentou maior consumo de tempo nessa etapa do ciclo de trabalho, quando comparado aos T1 e T2. Esse comportamento confirma os resultados obtidos por outros autores que estudaram a extração de cargas puras e mistas com o *forwarder* (NURMINEN et al. 2006; MANNER et al., 2013; STRANDGARD et al., 2017).

Quando cargas puras (T1) foram extraídas, praticamente não houve a necessidade de deslocamentos para o descarregamento (STRANDGARD et al., 2017). No presente estudo, esse comportamento também pode ser atribuído ao T2,

que apresentou baixo consumo de tempo nesse elemento do ciclo de trabalho. Nesse caso, cada pilha de madeira ficava disposta em um dos lados do *forwarder* no momento do descarregamento, não havendo grandes necessidades de deslocamento da máquina para descarregar os dois sortimentos em sequência. No T3 houve constante necessidade de deslocamentos entre pilhas para o descarregamento dos sortimentos, o que justificou o maior consumo de tempo nessa etapa do ciclo de trabalho em relação aos demais tratamentos.

O volume por ciclo, apesar de ter se mostrado significativo ($p = 0,02$), não apresentou relações significativas com os tempos consumidos em 'viagem durante o descarregamento' ($r = 0,03$; $p = 0,60$). Provavelmente, os efeitos dos tratamentos testados tenham se refletido na significância desse fator, uma vez, que houveram diferenças consideráveis entre os volumes médios por ciclo entre os tratamentos, conforme discutido anteriormente.

Os tratamentos estudados exerceram influência significativa na produtividade do *forwarder* (TABELA 26, p. 112), portanto, a modelagem dessa variável foi realizada separadamente para cada tratamento.

Além de mostrar dependência dos tratamentos, essa variável foi influenciada pelo volume por ciclo, volume por tora e distância de extração (TABELA 26). Outros trabalhos da literatura demonstraram a influência desses fatores na produtividade dessa máquina. Alguns desses estudos modelaram a produtividade em função do volume por ciclo e distância de extração (TIERNAN et al., 2004; WALSH & STRANDGARD, 2014; STRANDGARD et al., 2017), ao passo que, outros utilizaram o volume por tora e distância de extração (OLIVEIRA et al., 2009; GHAFARIYAN et al., 2012; SOUZA et al., 2018b).

No presente estudo, a modelagem da produtividade foi realizada em função do volume por tora e distância de extração (TABELA 27, p. 116), as quais são variáveis, relativamente, de fácil obtenção. Isso confere às equações, maior aplicabilidade prática.

As equações de todos os tratamentos foram significativas segundo a análise de variância ($p < 0,01$). O erro padrão da estimativa relativo foi maior nos tratamentos em que um menor número de sortimentos por carga foi extraído, o que é justificado pela maior variabilidade da produtividade nesses tratamentos, sobretudo no T1, no qual o volume por ciclo teve maior amplitude (TABELA 25, p. 111).

TABELA 27 – EQUAÇÕES PARA PREDIÇÃO DA PRODUTIVIDADE (P_{PMH}) DO FORWARDER NOS TRATAMENTOS ESTUDADOS E ESTATÍSTICAS DE PRECISÃO.

Tratamento	Regressão	R^2 aj.	Syx ($m^3 PMH_0^{-1}$)	Syx% (%)	F
1	$P_{PMH} = 54,778 + 63,938 * V_{tora} - 7,924 * \ln(DE)$	0,50	10,6	25,9	85,0**
2	$P_{PMH} = 62,150 + 76,437 * V_{tora} - 8,666 * \ln(DE)$	0,50	10,1	22,4	44,6**
3	$P_{PMH} = 46,683 + 63,375 * V_{tora} - 5,083 * \ln(DE)$	0,46	6,3	15,2	56,8**

FONTE: O autor (2019).

Legenda: V_{tora} = volume por tora ($m^3 tora^{-1}$); DE = distância de extração (m); **equação significativa ao nível de 1% de probabilidade.

As produtividades médias dos tratamentos estudados ($T1 = 40,8 m^3 PMH_0^{-1}$; $T2 = 45,1 m^3 PMH_0^{-1}$; $T3 = 41,3 m^3 PMH_0^{-1}$) podem ser consideradas similares à encontrada por Strandgard et al. (2017) ($43,6 m^3 PMH_0^{-1}$), que estudou o desempenho de um *forwarder* com capacidade de carga de 18 toneladas, na extração de toras de *Pinus radiata*, com volumes por tora semelhantes ($0,15 - 0,46 m^3 tora^{-1}$). No entanto, esses autores reportam distância média de extração maior (428 m) em relação às apresentadas nesse estudo (108 – 131 m), o que denota que os seus resultados de desempenho são superiores aos encontrados nessa pesquisa.

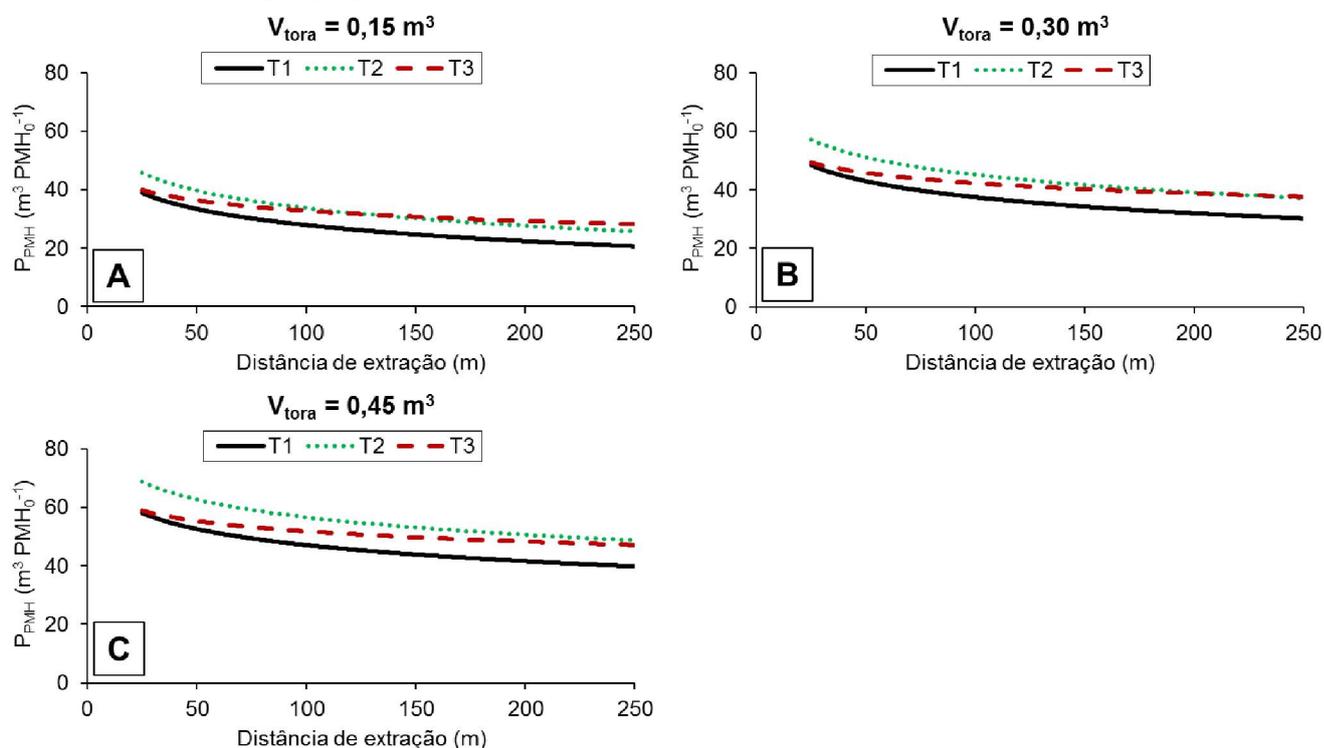
Ghaffariyan et al. (2012) relatam produtividade média expressivamente superior ($80,9 m^3 PMH_0^{-1}$) às supracitadas, para distâncias de extração e declividade similares às estudadas (134 m e $3,4^\circ$, respectivamente). Contudo, em sua pesquisa o volume médio por tora ($0,72 m^3 tora^{-1}$) foi mais do que duas vezes superior ao desse estudo ($0,28 - 0,34 m^3 tora^{-1}$), o que justifica a considerável diferença.

A declividade do terreno não influenciou a produtividade da extração (TABELA 26, p. 112). Esse comportamento é decorrente dos baixos valores médios de declividade ($<5^\circ$) obtidos nesse estudo, aliado às condições favoráveis de baixa umidade do solo durante o experimento. Segundo Tiernan et al. (2004), essas condições podem ser classificadas como fáceis para a realização da extração, o que fortalece os resultados obtidos.

Em todos os tratamentos, a produtividade apresentou relação linear positiva com o volume por tora, o que denota o seu aumento quando toras de maiores dimensões foram extraídas. Essa variável também diminui de forma logarítmica com o aumento da distância de extração (FIGURA 20A, 20B e 20C). Souza et al. (2018b) reportaram resultados que corroboram parcialmente os encontrados nesse estudo, inferindo relações logarítmicas entre a produtividade dessa máquina com volume por

tora e distância de extração, para condições semelhantes de povoamento e maiores declividades.

FIGURA 20 – VARIACÃO DA PRODUTIVIDADE (P_{PMH}) DO FORWARDER EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DE EXTRAÇÃO, PARA VOLUMES POR TORAS (V_{tora}) DE $0,15 \text{ m}^3$ (A), $0,30 \text{ m}^3$ (B) E $0,45 \text{ m}^3$ (C). COEFICIENTES DAS EQUAÇÕES SÃO APRESENTADOS NA TABELA 28.



FONTE: O autor (2019).

Os efeitos dos tratamentos na produtividade do *forwarder* tiveram alterações quando considerados diferentes volumes por tora e distâncias de extração. O T1 apresentou o pior desempenho quando comparado aos demais (FIGURA 20A, 20B e 20C). Esses resultados sugerem que o T1 não deve ser recomendado para as condições de estudo, onde existe um número considerável de sortimentos com baixos volumes por hectare em condição de densidade de estradas elevada ($66,7 \text{ m ha}^{-1}$).

Nesse caso, a elevada densidade de estradas tornava os ramais de extração mais curtos. Essa condição, por vezes, limitava a extração de cargas completas de sortimentos puros (T1), devido à insuficiência na concentração de toras dos sortimentos ao longo do ramal de extração, sobretudo, aqueles que têm menor representatividade na área. Portanto, o uso do T1 nessa condição apresentou o menor volume médio por ciclo, o que se refletiu na menor produtividade dentre os tratamentos testados, indiferentemente do volume por tora (FIGURA 20A, 20B e 20C).

Resultados contrários são reportados por Kellogg e Bettinger (1994) e Nurminen et al. (2006), que inferiram melhor desempenho do *forwarder* quando cargas puras foram extraídas. No entanto, suas pesquisas diferem fundamentalmente do presente estudo, em relação ao comprimento dos ramais de extração, número de sortimentos e, sobretudo, representatividade volumétrica de cada sortimento por unidade de área. Manner et al. (2013) relataram que o número de sortimentos mais eficiente em uma carga é dependente da concentração total de toras, o que apoia os resultados reportados no presente estudo. Tal contraste de resultados e a influência das variáveis supracitadas evidenciam a importância de estudos *in loco* para adoção do melhor método de trabalho.

O volume por tora e distância de extração influenciaram o comportamento da produtividade no T2 e T3, o que gerou diferentes recomendações quanto ao método de trabalho de acordo com as variações desses fatores. O desempenho do T2 foi mais sensível à variações no volume por tora e distância de extração do que o T3. Portanto, principalmente em condições de volume por tora elevados ($0,45 \text{ m}^3 \text{ tora}^{-1}$), o uso desse tratamento mostrou-se mais apropriado para a extração em toda a amplitude de distâncias de extração estudada (10 – 250 m) (FIGURA 20C, p. 117).

No entanto, para o menor volume por tora considerado ($0,15 \text{ m}^3 \text{ tora}^{-1}$), o uso desses dois tratamentos seria equivalente numa distância de extração de 130 m. Em distâncias inferiores a esse valor, o T2 se sobressai em relação ao T3, ao passo que para valores superiores, o T3 seria mais apropriado (FIGURA 20A, p. 117).

No mesmo contexto, para volumes de $0,30 \text{ m}^3 \text{ tora}^{-1}$, o T2 apresenta desempenho superior até a distância de 224 m, na qual se torna equivalente ao T3. A partir dessa distância de extração, a utilização do T3 parece ser mais apropriada para a extração (FIGURA 20B, p. 117).

Esses resultados sugerem que o método de trabalho não deve ser estudado isoladamente, pois existem interações dos mesmos com características técnicas e do povoamento, as quais influenciam nas respostas de desempenho da máquina estudada. Dessa forma, a recomendação do método de trabalho a ser empregado dependerá de características fundamentais, como por exemplo, o volume médio por tora gerado pelos povoamentos, número de sortimentos produzidos, volume de cada sortimento por unidade de área e densidade de estradas do local.

5.5.1.3 Carregamento

O carregamento foi estudado para volumes por tora que variaram de 0,07 a 0,75 m³ tora⁻¹, com média de 0,34 m³ tora⁻¹ (TABELA 28). O erro de amostragem para a produtividade do carregador florestal foi de 1,7%.

TABELA 28 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA E TEMPOS CONSUMIDOS NOS ELEMENTOS DO CICLO DE TRABALHO DO CARREGADOR FLORESTAL NO CARREGAMENTO DE TORAS DE *Pinus taeda*.

Duração do estudo (SMH)	63,2	Erro de amostragem relativo, %	1,7
Duração das observações válidas (PMH ₀)	34,9	P _{PMH} , amplitude (m ³ PMH ₀ ⁻¹)	15,7 - 258,73
Número de observações válidas (ciclos)	2945	P _{PMH} , média (SE) (m ³ PMH ₀ ⁻¹)	98,5
Deslocamento da grua vazia, média (SE) (s m ⁻³)	6,5 (0,1)	V _{ciclo} , amplitude (m ³ árv. ⁻¹)	0,1 - 2,7
Arrumação da carga na grua, média (SE) (s m ⁻³)	12,8 (0,2)	V _{ciclo} , média (SE) (m ³ árv. ⁻¹)	1,0
Deslocamento da grua carregada média (SE) (s m ⁻³)	7,5 (0,1)	V _{tora} , amplitude (m ³ tora ⁻¹)	0,07 - 0,75
Arrumação da carga no veículo, média (SE) (s m ⁻³)	19,5 (0,3)	V _{tora} , média (SE) (m ³ tora ⁻¹)	0,34
Deslocamento entre pilhas, média (SE) (s m ⁻³)	0,3 (0,1)	Volume produzido no estudo, m ³	3020,5

FONTE: O autor (2019).

Em que: SMH = hora-máquina programada; PMH₀: hora-máquina produtiva livre de interrupções; SE: erro padrão da média; P_{PMH}: produtividade por hora-máquina produtiva livre de interrupções; V_{ciclo}: volume por ciclo; V_{tora}: volume por tora;

Os maiores consumos de tempo foram na ‘arrumação da carga no veículo’ (42%) (TABELA 28). Esse resultado é corroborado por Dos Santos et al. (2009), que encontraram uma representatividade ainda maior (49%) dessa etapa no ciclo de trabalho dessa máquina. Esses autores atribuem esses resultados à necessidade de ‘bater’ com a grua nas toras para acomodação da carga no veículo, o que também ocorreu nesse estudo.

Além disso, mudanças no posicionamento das toras eram comuns na finalização das cargas. Essa medida era realizada com o objetivo de distribuir o peso da carga de forma mais uniforme no compartimento de carga do veículo, sobretudo, para toras com maiores dimensões. Essas atividades contribuíram para os maiores consumos de tempo nessa etapa.

A ‘arrumação da carga na grua’ representou 27% do tempo do ciclo de trabalho. Lopes et al. (2006), Fiedler et al. (2008) e Dos Santos et al. (2009) relataram a qualidade de organização das pilhas como fator influente nessa etapa. No presente estudo, era comum a necessidade de reclassificação de toras de outros sortimentos, que por ventura estavam misturadas nas pilhas, bem como, por algum motivo não atendiam a prescrição do sortimento (por exemplo, presença de nós, insuficiência no

diâmetro na ponta fina e comprimento). Esses casos contribuíram para o aumento nos tempos despendidos nesse elemento do ciclo de trabalho.

Os 'deslocamentos da grua vazia' e 'carregada' representaram juntos cerca de 30% do ciclo de trabalho. Essas etapas, provavelmente, estão relacionadas à distância que a pilha de toras ficava em relação ao veículo de transporte. No caso de distâncias maiores que o alcance do braço hidráulico, por vezes, era necessário o deslocamento da máquina para carregar a madeira, o que gerava maior consumo de tempos nessas etapas.

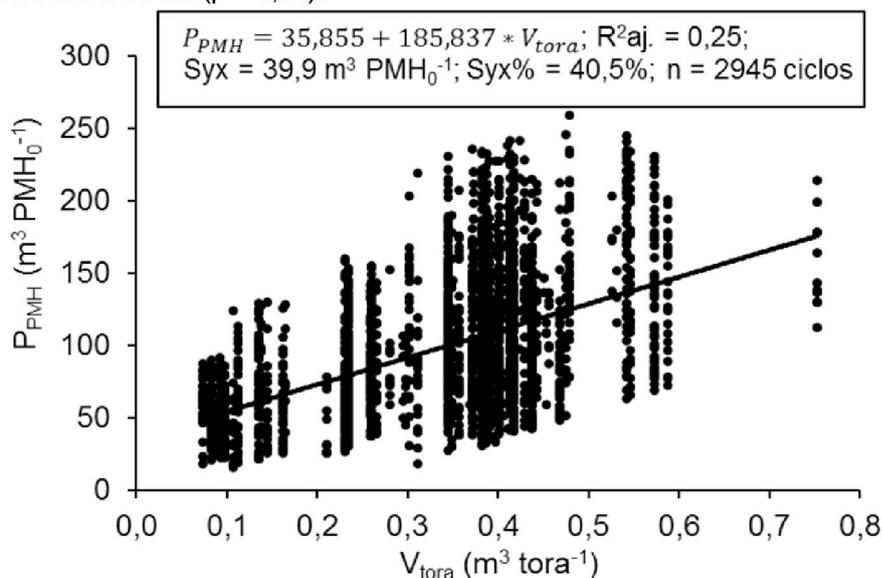
Todos os elementos do ciclo de trabalho do carregador florestal foram dependentes do volume por tora segundo a modelagem linear generalizada ($p < 0,01$), exceto o deslocamento entre pilhas ($p = 0,08$).

Essa etapa do ciclo de trabalho apresentou enorme variação dos dados (coeficiente de variação = 1.275%), pois ocorria raramente nas atividades. Apenas 1,2% dos ciclos de trabalho analisados apresentaram a ocorrência de deslocamento entre pilhas. No entanto, o tempo despendido nessa atividade não pode ser ignorado, pois contribui com a variabilidade da produtividade da máquina. É provável que os tempos consumidos nesse elemento do ciclo de trabalho estejam relacionados ao tamanho e distância das pilhas de madeira.

A máquina apresentou produtividade média de $98,5 \text{ m}^3 \text{ PMH}_0^{-1}$. Esse valor é inferior ao encontrado por Ghaffarian et al. (2012) ($100,8 \text{ m}^3 \text{ PMH}_0^{-1}$), que analisaram um carregador Komatsu P300 com garra Randalls no carregamento de toras de *Pinus radiata*. No entanto, os estudos diferem quanto ao tamanho das toras, pois esses autores observaram volumes por tora que variaram de 0,4 até $1,5 \text{ m}^3 \text{ tora}^{-1}$. Esse fato justifica a diferença de desempenho das máquinas.

A produtividade do carregador florestal foi dependente do volume por tora (FIGURA 21). Essas variáveis apresentaram relação linear positiva. Portanto, o carregamento de toras de maiores dimensões aumentaram a produtividade da máquina. Quando considerados volumes das toras de 0,07 a $0,75 \text{ m}^3 \text{ tora}^{-1}$, a produtividade apresentou variação de 48,9 a $175,2 \text{ m}^3 \text{ PMH}_0^{-1}$ pela equação ajustada. Diniz et al. (2018) corroboram os resultados do presente estudo. Esses autores relataram diferenças no desempenho dessa máquina em função do carregamento de diferentes sortimentos, com aumento da produtividade à medida que os comprimentos das toras foram maiores.

FIGURA 21 - VARIACÃO DA PRODUTIVIDADE (P_{PMH}) DO CARREGADOR FLORESTAL EM FUNÇÃO DO VOLUME POR TORA (V_{tora}). EQUAÇÃO SIGNIFICATIVA PELA ANÁLISE DE VARIÂNCIA ($p < 0,01$).



FONTE: O autor (2019).

5.5.2 Custos

Os custos operacionais horários do *harvester*, *forwarder* e carregador florestal foram de 347,52 R\$ SMH⁻¹, 181,09 R\$ SMH⁻¹ e 104,45 R\$ SMH⁻¹, respectivamente (TABELA 29).

TABELA 29 – CUSTOS OPERACIONAIS HORÁRIOS DO *HARVESTER*, *FORWARDER* E CARREGADOR FLORESTAL EM OPERAÇÕES DE CORTE FINAL DE *Pinus taeda*.

Categorias de custo	Custos (R\$ SMH ⁻¹)		
	<i>Harvester</i>	<i>Forwarder</i>	Carregador florestal
Fixos			
Depreciação	95,27	43,69	8,25
Pessoal operacional	35,44	29,33	29,10
Juros e seguros	14,36	7,93	3,01
Variáveis			
Combustível	84,32	44,06	27,84
Óleo hidráulico e lubrificantes	8,43	4,41	11,57
Material rodante	12,50	7,68	12,00
Manutenção	71,45	30,58	4,95
Administrativos	25,74	13,41	7,74
Custo operacional horário	347,52	181,09	104,45

FONTE: O autor (2019).

Para o *harvester*, os custos mais representativos foram depreciação (27,4%), combustível (24,3%) e manutenção (20,6%). Para o *forwarder* o maior custo foi com combustível (24,3%), seguido da depreciação (24,1%), manutenção (16,9%) e pessoal operacional (16,2%). O carregador florestal apresentou maiores custos com pessoal operacional (27,9%) e combustível (26,7%). A depreciação do carregador (7,9%) não teve expressiva representatividade como componente do custo operacional horário, pois o mesmo não foi adquirido novo. Dessa forma, o custo de aquisição dessa máquina foi consideravelmente inferior aos do *harvester* e *forwarder*.

O custo médio de produção do *harvester* foi 5,21 R\$ m⁻³. Esse valor é inferior aos encontrados por Lopes et al. (2007) (7,76 R\$ m⁻³) e Drinko et al. (2015) (5,68 R\$ m⁻³), que estudaram outros modelos de *harvester* de esteiras no corte raso de povoamentos de *Pinus taeda* no sul do Brasil. Essas diferenças são justificadas pela menor produtividade das máquinas nos seus estudos, em decorrência, principalmente, dos menores volumes individuais das árvores (0,42 – 0,50 m³ árv.⁻¹) em relação a esse estudo.

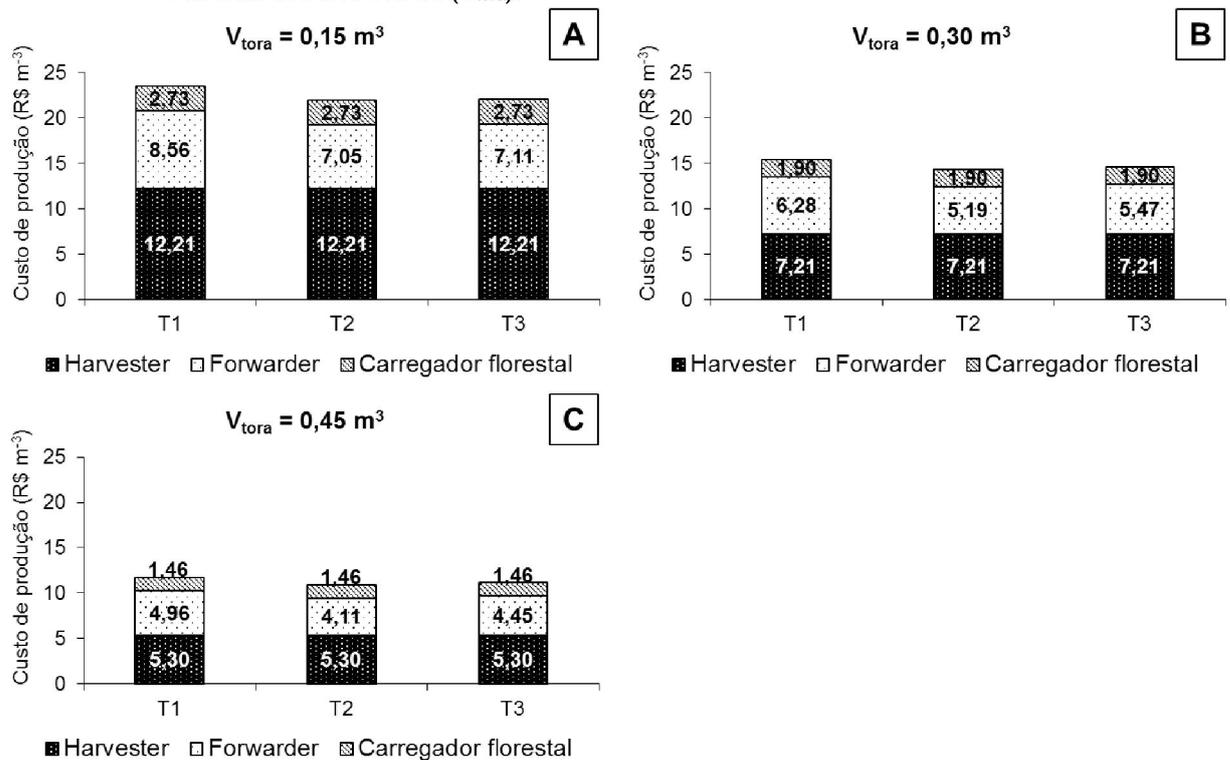
O *forwarder* apresentou custos de produção médios de 6,28 R\$ m⁻³, 5,19 R\$ m⁻³ e 5,47 R\$ m⁻³ quando utilizados os T1, T2 e T3, respectivamente. Oliveira et al. (2009) reportaram custo de produção médio superior (6,84 R\$ m⁻³). Esses autores analisaram um *forwarder* Valmet 890.3 com capacidade de carga de 18 toneladas na extração de *Pinus taeda*. O maior custo de produção em relação ao presente estudo também está relacionado à menor produtividade da máquina, que por sua vez, está ligada aos menores volumes médios por tora (0,05 – 0,18 m³ tora⁻¹) estudados por esses autores.

Tendo em vista as comparações realizadas com outros trabalhos da literatura, nota-se que no corte final de povoamentos manejados em longas rotações, nos quais têm-se elevados volumes das árvores e das toras, as atividades de corte e extração podem assumir custos de produção mais baixos em relação à povoamentos manejados em rotações mais curtas, devido à maior produtividade das máquinas.

O custo médio de produção do carregamento (1,77 R\$ m⁻³) foi maior aos relatados por Simões et al. (2012), que estudaram dois modelos de carregadores florestais com área da grua de 0,5 m² (1,34 R\$ t⁻³) e 1,0 m² (0,99 R\$ t⁻³) no carregamento de toras de *Eucalyptus grandis*. As diferenças nos custos de produção estão associadas, principalmente, ao maior custo operacional horário estimado para o carregador florestal no presente estudo.

Os custos de produção do sistema de colheita para a distância de extração média são apresentados na FIGURA 22. As simulações demonstram que houveram reduções significativas no custo de produção do sistema com o aumento do volume por tora. Nas simulações realizadas, considerando variações de $0,15 \text{ m}^3 \text{ tora}^{-1}$ até $0,45 \text{ m}^3 \text{ tora}^{-1}$ (FIGURA 22A e 22C), os custos de produção do *harvester* e carregador florestal sofreram reduções de 56,6% e 46,5%, ao passo que para o *forwarder* os custos diminuíram 42,1%, 41,7% e 37,4% para os T1, T2 e T3, respectivamente.

FIGURA 22 – ESTIMATIVAS DOS CUSTOS DE PRODUÇÃO DAS MÁQUINAS ESTUDADAS PARA A DISTÂNCIA DE EXTRAÇÃO DE 120 METROS, CONSIDERANDO DIFERENTES VOLUMES POR TORA (V_{tora}).



FONTE: O autor (2019).

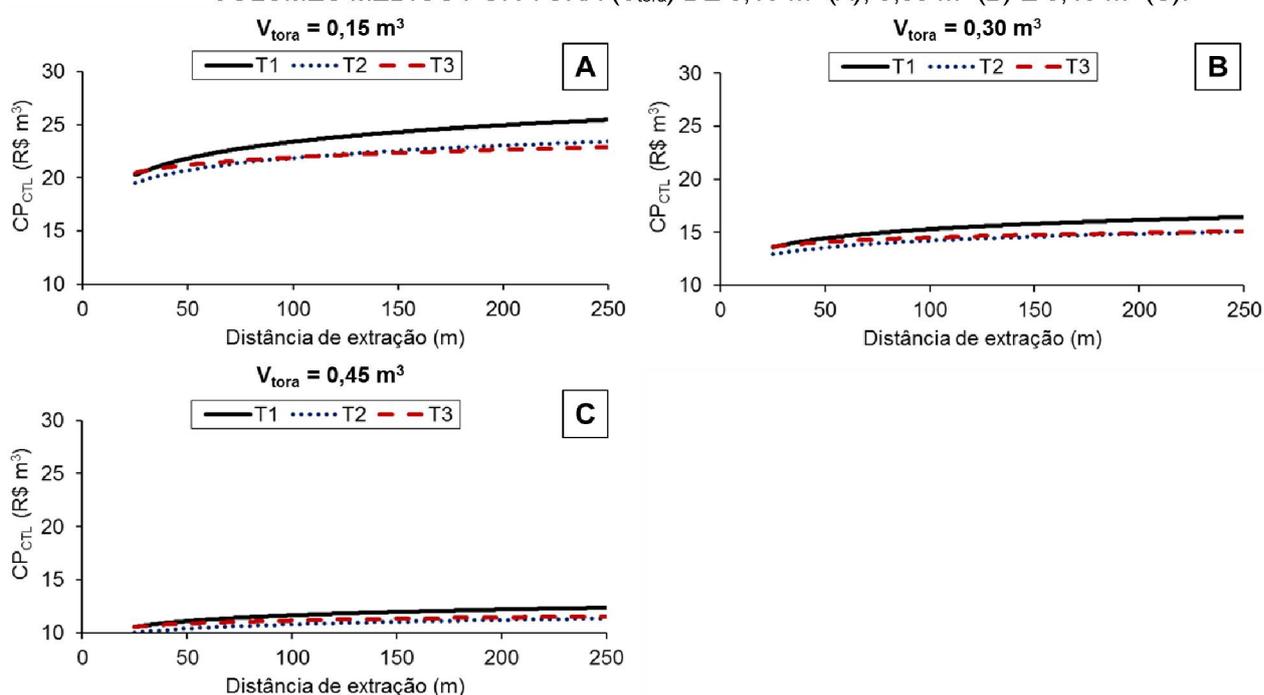
Ademais, os custos de extração e carregamento assumiram maior representação percentual em relação ao custo total do sistema, à medida que foram considerados maiores volumes por tora. Diferentemente, os custos de produção do *harvester* apresentaram comportamento contrário, diminuindo sua participação percentual com o aumento do volume por tora (FIGURA 22A, 22B e 22C). Isso denota que o impacto do acréscimo no volume por tora é maior na produtividade do *harvester* quando comparado ao *forwarder* e carregador florestal.

Nas condições médias da área de estudo (FIGURA 22B, p. 123), quando utilizados T1 e T3 como método de trabalho, os custos de produção da extração foram 21,0% e 5,4% superiores ao T2, respectivamente. Portanto, a utilização dos T1 e T3 representaria um acréscimo de 7,6% e 2,0% no custo total de produção do sistema em relação ao uso do T2.

A superioridade do T2 está relacionada ao elevado volume por unidade de área de dois dos sortimentos produzidos (sortimento 5 e 6), que juntos representaram 66% do volume total da área (TABELA 18, p. 98). Além disso, a alta densidade de estradas ($66,7 \text{ m ha}^{-1}$) possibilitou a otimização do tempo despendido no 'descarregamento' e 'viagem durante o descarregamento' nesse tratamento, devido à grande área disponível na margem da estrada para a formação das pilhas de toras, conforme já discutido.

Além da influência do volume por tora e método de trabalho do *forwarder*, o custo total de produção do sistema também foi dependente da distância de extração, devido às variações na produtividade do *forwarder*. Esses custos apresentaram aumento à medida que foram consideradas maiores distâncias de extração (FIGURA 23A, 23B e 23C).

FIGURA 23 – VARIÇÃO DO CUSTO TOTAL DE PRODUÇÃO DO SISTEMA (CP_{CTL}) PARA OS TRATAMENTOS ESTUDADOS EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DE EXTRAÇÃO, PARA VOLUMES MÉDIOS POR TORA (V_{tora}) DE $0,15 \text{ m}^3$ (A), $0,30 \text{ m}^3$ (B) E $0,45 \text{ m}^3$ (C).



FONTE: O autor (2019).

O T1 apresentou os maiores custos totais de produção do sistema em todas as simulações realizadas (FIGURA 23A, 23B e 23C, p. 124). Para todos os volumes por tora analisados, à medida que maiores distâncias de extração foram assumidas, esse tratamento apresentou custos totais ainda mais pronunciados em relação aos demais tratamentos, em decorrência da maior sensibilidade à essa variável.

No mesmo sentido, a diferença no custo total de produção entre o T1 e os demais tratamentos foi ainda maior, quando considerados menores volumes por tora (FIGURA 23A, p. 124). Esses resultados evidenciam que a utilização desse tratamento não é recomendada para as condições de estudo, sobretudo, para povoamentos que tenham menores volumes por tora.

A recomendação do método de trabalho para a realização da extração, quanto ao T2 e T3, mostrou-se dependente do volume por tora e distância de extração. À medida considerados maiores volumes por tora, o T2 se mostrou mais adequado para a realização da operação até distâncias de extração mais longas. Considerando-se volume por tora de $0,45 \text{ m}^3$ e distância de extração de 250 m, esse tratamento apresentou menor custo total de produção do sistema ($11,40 \text{ R\$ m}^{-3}$) em relação ao T3 ($11,56 \text{ R\$ m}^{-3}$) (FIGURA 23C, p. 124), o que denota vantagem ao T2 para volumes por tora elevados na amplitude de distâncias de extração estudada.

No entanto, segundo as simulações, houve alternância na recomendação do método de trabalho a ser utilizado, de acordo com o volume por tora e distância de extração (FIGURA 23A e 23B, p. 124). Quando considerados volumes por tora de $0,15 \text{ m}^3$ e $0,30 \text{ m}^3$, o T2 é recomendado para trabalhos em distâncias de extração de até 130 m e 224 m, respectivamente, pois apresenta custo total de produção menor do que o T3.

Contudo, para as mesmas condições de volume por tora, em distâncias de extração mais longas que esses valores, o T3 passaria a ter menores custos totais de produção em relação a T2 (FIGURA 23A e 23B, p. 124), sendo o método de trabalho recomendado para essas situações. Cabe ressaltar que esses resultados são projeções e, ainda que a amostragem tenha abrangido distâncias de extração maiores que 220 m, o número de ciclos amostrados nessa condição foi baixo para todos os tratamentos analisados. Dessa forma, essas inferências estão sujeitas às limitações amostrais do estudo.

De acordo com as simulações apresentadas, possíveis modificações relacionadas ao regime de manejo, prescrição dos sortimentos produzidos e

densidade de estradas do local, podem alterar a recomendação do método de trabalho a ser utilizado na extração. Essas alterações podem modificar variáveis como o volume médio por tora, representatividade volumétrica dos sortimentos por unidade de área e distância média de extração. Isso levaria a variações no custo total de produção do sistema analisado, podendo, por exemplo, tornar o T3 mais viável economicamente do que o T2 em determinadas circunstâncias.

5.6 CONCLUSÕES

Os resultados do presente estudo permitem chegar nas seguintes conclusões:

- O volume por tora influencia o desempenho do *harvester*, *forwarder* e carregador florestal. Quanto maior o volume por tora, melhor é o desempenho dessas máquinas, e conseqüentemente, os custos de produção do corte, extração e carregamento são menores. Esses resultados confirmam a primeira hipótese levantada nesse estudo.

- O desempenho da extração sofre variações de acordo com o método de trabalho do *forwarder*. No entanto, a segunda hipótese formulada no presente estudo é rejeitada, pois a extração de cargas com apenas 1 sortimento (T1) apresenta o pior desempenho e os maiores custos de produção da extração, dentre os tratamentos estudados.

- Nas condições médias do estudo, a extração simultânea de 2 sortimentos (T2) fornece o melhor desempenho dentre os tratamentos testados, e por consequência, quando utilizado esse método de trabalho, o menor custo total de produção do sistema de colheita é obtido.

- A análise de sensibilidade demonstra que mudanças no volume por tora e distância média de extração podem viabilizar a utilização do T3 (extração de 3 ou mais sortimentos por ciclo de trabalho), pois, em determinadas situações, esse tratamento apresenta menor custo total de produção do sistema quando comparado ao T2.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa pesquisa utiliza diferentes abordagens do estudo do trabalho aplicado às operações florestais, para avaliar o desempenho e custos de produção das operações de desbaste pré-comercial e corte final de povoamentos de *Pinus taeda* manejados para o uso múltiplo da madeira. No Brasil, poucas são as informações disponíveis na literatura acerca dessas temáticas e os conhecimentos gerados a partir desse estudo poderão contribuir com o planejamento dessas atividades, bem como com adequações que melhorem a rentabilidade dos cultivos dessa espécie.

No Capítulo 1, os tratamentos de desbaste pré-comercial aplicados à floresta apresentam diferentes desempenhos e custos de produção da operação realizada de forma semimecanizada. Além disso, os efeitos desses tratamentos no povoamento mostram diferenças fundamentais em relação à liberação de espaço para crescimento das árvores remanescentes e percentual de engaiolamento na operação. No entanto, a determinação da viabilidade econômica dessas prescrições somente será conseguida, após avaliações futuras do crescimento das árvores remanescentes.

Dessa forma, é cabível a recomendação de estudos futuros para a avaliação do crescimento desses povoamentos. Esses novos estudos irão possibilitar análises econômicas aprofundadas acerca dos efeitos no crescimento das árvores remanescentes, considerando os diferentes tratamentos aplicados. O presente estudo fornece subsídios importantes e necessários para a determinação assertiva da viabilidade econômica dos tratamentos estudados, uma vez que, ainda não existem informações relacionadas ao desempenho e custos dessas operações na literatura.

O diâmetro à altura do peito das árvores desbastadas também influencia o desempenho e custos dessas operações, no sentido que, para maiores dap's, os tempos consumidos na derrubada e custos de produção são superiores. Esse comportamento denota que a antecipação dessa intervenção levaria à redução nos custos por unidade de área produzida. No entanto, a realização mais precoce dessas operações pode levar a equívocos na seleção das árvores potenciais quando o desbaste 'pelo alto' é utilizado.

Portanto, em estudos posteriores, essa intervenção pode ser aplicada em povoamentos mais jovens aos estudados nessa pesquisa, com vistas à determinar se há possibilidade de selecionar árvores potenciais de forma adequada em idades mais precoces, possibilitando a redução nos custos de produção.

Além disso, o presente estudo foi realizado apenas para condições de terreno plano e sem rochas na superfície do solo. A alteração na declividade do terreno e a presença de rochas superficiais pode piorar o desempenho, e conseqüentemente, aumentar os custos de produção dessa operação. Sendo assim, é importante que estudos porvindouros avaliem a realização do desbaste pré-comercial em situações mais restritivas de terreno, para se ter conhecimento do desempenho e custos nessas condições.

O Capítulo 2 oferece uma visão sobre o funcionamento dos sistemas mecanizados de colheita de árvores inteiras (FT) e toras curtas (CTL) e um modelo metodológico que considera a questão dos gargalos de produção dos sistemas. Essa metodologia é passível de utilização para a determinação da densidade ótima da malha viária florestal e dos custos com colheita e estradas florestais. A aplicação prática desses resultados seria o desenvolvimento específico do suporte à tomada de decisão *in loco* para a negociação da madeira colhida por meio dos dois sistemas, além de permitir adequações que aumentem a lucratividade dos cultivos florestais manejados a longo prazo.

Os resultados desse estudo permitem diagnosticar diferenças importantes entre os dois sistemas de colheita. O sistema FT apresenta menores custos totais de produção considerando a colheita e estradas florestais, quando comparado ao CTL. No entanto, o segundo sistema demonstra menor sensibilidade a densidade de estradas, apresentando maior versatilidade para trabalhar em situações onde se tem baixa densidade de malha viária florestal.

Dessa forma, apesar de apresentarem diferenças fundamentais, tanto o sistema FT quanto o sistema CTL mecanizados são alternativas com custos de produção atrativos para a colheita de povoamentos manejados em longas rotações e podem retornar lucro sob condições favoráveis de mercado e terreno. A escolha por uma dessas opções deverá considerar, além do custo total de produção, as condições do povoamento e terreno, escala de produção, preços de mercado, aspectos ambientais, interface com a silvicultura, custos com qualidade no processo, densidade de malha viária e área de pátios intermediários disponível.

O Capítulo 3 gera conhecimento sobre o desempenho e custos de produção do sistema mecanizado de colheita toras curtas, em operações de corte final de povoamentos de *Pinus taeda* com elevados volumes individuais. Ademais, possibilita a verificação da variação dos custos de produção do sistema, em função das principais

variáveis do processo (volume por tora, distância de extração e métodos de trabalho na extração) que influenciam o desempenho das máquinas.

A aplicação prática dos resultados obtidos pode levar a reduções nos custos de produção da colheita florestal nessas condições, com a simples implementação do método de trabalho mais adequado economicamente na etapa de extração. Além disso, o volume por tora e distância de extração foram usados como variáveis independentes na predição da produtividade das máquinas. Dessa forma, as estimativas geradas com o uso dessas variáveis podem nortear a negociação da madeira colhida nas condições de estudo, bem como, permitir a elaboração de cronogramas de colheita florestal com maior assertividade.

REFERÊNCIAS

- ACKERMAN, P.; GLEASURE, E.; ACKERMAN, S.; SHUTTLEWORTH, B. **Standards for time studies for the South African forest industry**. South African: ICFR/FESA, 2014. 49 p.
- ADEBAYO, A. B.; HAN, H.; JOHNSON, L. Productivity and cost of cut-to-length and whole-tree harvesting in a mixed-conifer stand. **Forest Products Journal**, LaGrange, v. 57, n. 6, p. 59 – 69, 2007.
- ADEBAYO, A. B.; HAN, H.; JOHNSON, L. Productivity and cost of cut-to-length and whole-tree harvesting in mixed-conifer stand in northern Idaho. In: **WORKING GLOBALLY – SHARING FOREST ENGINEERING CHALLENGES AND TECHNOLOGIES AROUND THE WORLD**, 2006, Coeur d’Alene – Idaho. **Proceedings...** Coeur d’Alene: Council on Forest Engineering (COFE), 2006. p. 127 – 136.
- AHRENS, S. **A concepção de regimes de manejo para plantações de *Pinus* spp. no Brasil**. Curitiba: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, Circular Técnica nº 10, 1987. 19 p.
- AHRENS, S. **A seleção simultânea do ótimo regime de desbastes e da idade de rotação, para povoamentos de *Pinus taeda* L., através de um modelo de programação dinâmica**. 1992. 199 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1992.
- AKAY, A.E.; ERDA, O.; SESSIONS, J. Determining productivity of mechanized harvesting machines. **Journal of Applied Sciences**, v. 4, n.1, p. 100-105, 2004.
- ALAM, M.; WALSH, D.; STRANDGARD, M.; BROWN, M. A log-by-log productivity analysis of two Valmet 475EX harvesters. **International Journal of Forest Engineering**, Umea, v. 25, n. 1, p. 14 – 22, 2014.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G.. Köppen’s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**. v.22, n. 6, p. 711-728, 2014.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **ASAE standards 2001: machinery, equipment, and buildings: operating costs**. Ames, 2001. 566 p. (ASAE D472-3).

AMPOORTER, E.; GORIS, R.; CORNELIS, W.M.; VERHEYEN, K. Impact of mechanized logging on compaction status of sandy forest soils. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 241, n. 1-3, p. 162 – 174, 2007.

AMPOORTER, E.; VAN NEVEL, L.; DE VOS, B.; HERMY, M.; VERHEYEN, K. Assessing the effects of initial soil characteristics, machine mass and traffic intensity on forest soil compaction. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 260, n. 10, p. 1664 – 1676, 2010.

ANDRADE, S. C. **Avaliação técnica, social, econômica e ambiental de dois sistemas de colheita florestal no litoral Norte da Bahia**. 1998. 125 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.

ARCE, J. E. **Um sistema de análise, simulação e otimização do sortimento florestal em função da demanda por multiprodutos e dos custos de transporte**. 2000. 136 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

ARCE, J. E.; MACDONAGH, P.; FRIEDL, R. A. Geração de padrões ótimos de corte através de algoritmos de traçamento aplicados a fustes individuais. **Revista Árvore**, Viçosa, v.28, n.2, p.383-391, 2004.

BAKER, J. B.; LANGDON, O. G. *Pinus taeda* L., Loblolly Pine. In: UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Silvics of North America, vol. I: Conifers**, Washington, DC, 1991. p. 497 - 512. (Agriculture Handbook, 654).

BARNES, R. M. **Estudo de movimentos e de tempos: projeto e medida do trabalho**. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 1977. 635 p.

BEHJOU F. K. MAJNOUNIAN, B. NAMIRANIAN, M. DVORAK, J. Time study and skidding capacity of the wheeled skidder Timberjack 450C in Caspian forests. **Journal of Forest Science**, v. 54, n. 4, p.183 –188, 2008.

BELBO, H. Whole tree harvesting in early thinnings and landscape management. In: SUADICANI, K.; TALBOT, B. **The Nordic-Baltic conference on forest operations**, Hørsholm: University of Copenhagen, 2008. p. 26.

BERGSTRAND, K. G. **Planning and analysis of forestry operation studies**. Skogsarbeten Bulletin, n. 17, 1991. 63 p.

BERTOLOTTI, G.; SIMÕES, J. W.; NICOLIELO, N.; GARNICA, J. B. Efeitos de diferentes métodos e intensidades de desbaste na produtividade de *Pinus caribea* var. *hondurensis* Barr. Et Golf. **IPEF**, Piracicaba, n. 24, p. 47 – 54, 1983.

BETTINGER, P.; KELLOGG, L. D. Residual stand damage from cut-to-length thinning of second-growth timber in the Cascade Range of western Oregon. **Forest Products Journal**, v. 47, p. 59 – 64, 1993.

BJÖRHEDEN, R. Basic time concepts for international comparisons of time study reports. **Journal of Forest Engineering**, v. 2, p. 33 – 39, 1991.

BJÖRHEDEN, R.; APEL, K.; SHIBA, M.; THOMPSON, M. A. **IUFRO Forest work study nomenclature**. Garpenberg: Department of Operational Efficiency, Swedish University of Agricultural Science, 1995. 16 p.

BRAMUCCI, M. **Determinação e quantificação de fatores de influência sobre a produtividade de “harvesters” na colheita de madeira**. 2001. 65 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Universidade de São Paulo (ESALQ), 2001.

BRAMUCCI, M.; SEIXAS, F. Determinação e quantificação de fatores de influência sobre a produtividade de *harvesters* na colheita florestal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 62, p. 62-74, 2002.

BRINKER, R. W.; KINARD, J.; RUMMER, B.; LANDFORD, B. **Machine rates for selected harvesting machines**. Auburn: Auburn University, 2002. 32 p.

BRITTO, P. C.; JAEGER, D.; HOFFMANN, S.; ROBERT, R. C. G.; FANTINI, A. C.; VIBRANS, A. C. Productivity assessment of timber harvesting techniques for supporting sustainable forest management of secondary Atlantic Forest in southern Brazil. **Annals of Forest Research**, v. 60, n. 2, p. 203 – 215, 2017.

BUFALINO, L.; PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; NASSUR, O. A. C.; SÁ, V. A.; TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M. Caracterização química e energética para aproveitamento da madeira de costaneira e desbaste de cedro australiano. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Curitiba, v. 32, n. 70, p. 129 – 137, 2012.

CARMO, F. C. A.; FIEDLER, N. C.; MINETTE, L. J.; SOUZA, A. P. Otimização do uso do trator florestal forwarder em função da produtividade, custos e capacidade de carga. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 39, n. 3, p. 561 – 566, 2015.

CLEWER, A. G.; SCARISBRICK, D. H. **Practical Statistics and Experimental Design for Plant and Crop Science**. London: John Wiley & Sons, 2001. 332 p.

COELHO, M. C. B.; FINGER, C. G. Crescimento em altura para *Pinus elliotti* Engelm originado por diferentes métodos de regeneração em canela, RS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 139 – 158, 1997.

CUBBAGE, F.; KOESBANDANA, S.; MAC DONAGH, P.; RUBILAR, R.; BALMELLI, G.; MORALES OLMOS V.; DE LA TORRE, R.; MURARA, M.; HOEFLICH, V. A.; KOTZE, H.; GONZALEZ, R.; CARRERO, O.; FREY, G.; ADAMS, T.; TURNER, J.; LORD, R.; HUANG, J.; MACINTYRE, C.; MCGINLEY, K.; ABT, R.; PHILLIPS, R. Global timber investments, wood costs, regulation, and risk. **Biomass and Bioenergy**, v. 34, n. 12, p. 1667 - 1678, 2010.

CUBBAGE, F.; MAC DONAGH, P.; SAWINSKI JR., J.; RUBILAR, R.; DONOSO, P.; FERREIRA, A.; HOEFLICH, V.A.; OLMOS, V.M.; FERREIRA, G.; BALMELLI, G.; SIRY, J.; BAEZ, M. N.; ALVAREZ, J. Timber investment returns for selected plantations and native forests in South America and the Southern United States. **New Forests**, Dodrecht, v. 33, n. 3, p. 237 - 255, 2007.

DAVEL, M. **Manejo de plantaciones**: Boletín Técnico. Argentina: Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico, Universidad Nacional de la Patagonia, 2009. 16 p.

DAVID, H. C.; ARCE, J. E.; PÉLLICO NETTO, S.; DALLA CORTE, A.; MARINHESKI FILHO, A. ARAÚJO, E. J. G. Efeito do desbaste e da qualidade do sítio na relação hipsométrica de *Pinus taeda*. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 23, n. 2, 2016.

DIAS JÚNIOR, M.S.; PIERCE, F.J. Revisão de literatura: o processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, p. 175 – 182, 1996.

DINIZ, C. C. C.; CERQUEIRA, C. L.; OLIVEIRA, F. M. Influência do sortimento de toras na produtividade de um carregador florestal. **Agropecuária Científica no Semiárido**, Patos, v. 14, n. 3, p. 247 – 253, 2018.

DOBNER JR, M. **Impacto do manejo de povoamentos na produtividade e qualidade da madeira de *Pinus taeda***. 2014. 330 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

DOBNER JR., M.; HUSS, J. **Desbaste pelo alto: uma alternativa rentável para povoamentos de *Pinus taeda* no Sul do Brasil.** Pomerode, SC: Imprensa Mayer, 2015. 28 p.

DOBNER JR., M.; NICOLETTI, M. F.; ARCE, J. E. Influence of crown thinning on radial growth pattern of *Pinus taeda* in southern Brazil. **New Forests**, Dodrecht, 2018. (Artigo aceito para publicação). Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11056-018-9669-x>. Acesso em: 15 jan. 2018.

DOS SANTOS, M. D.; LOPES, E. S.; DIAS A. N. Avaliação técnica de um carregador florestal com diferentes sortimentos de madeira. **Revista Ambiência**, Guarapuava, v. 5, n. 1, p. 13 – 26, 2009.

DRINKO, C. H.; LOPES, E. S.; OLIVEIRA, F. M. Produtividade e custos do corte de pinus com *harvester* de pneus e esteiras. **Enciclopédia biosfera**, Goiânia, v. 11, n. 22, p. 3664 – 3677, 2015.

ELESBÃO, L. E. G.; SCHNEIDER, P. R. Produção do *Pinus taeda* L. em povoamento desbastado na região dos campos de cima da serra, Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 1, p. 119 – 124, 2011.

FERNANDES, H. C.; BURLA, E. R.; LEITE, E. S.; MINETTE, L. J. Avaliação técnica e econômica de um “*harvester*” em diferentes condições de terreno e produtividade da floresta. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 97, p. 145 – 151, 2013.

FIEDLER, N. C.; ROCHA, E. B.; LOPES, E. S. Análise da produtividade de um sistema de colheita de árvores inteiras no norte do estado de Goiás. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 4, p. 577 – 586, 2008.

FINGER, C. A.; SCHNEIDER, P. R. Determinação do peso do desbaste para florestas de *Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden, com base no Índice de Espaçamento Relativo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 9, n. 1, p. 79 - 87, 1999.

FLACH, F. D. **Crescimento juvenil da regeneração espontânea de *Pinus elliotti* Eng. var. *elliottii* sob níveis de desbaste, no litoral norte do Rio Grande do Sul.** 2007. 66 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

GHAFFARIYAN, M. R.; SESSIONS, J.; BROWN, M. Machine productivity and residual harvesting residues associated with a cut-to-length harvest system in southern Tasmania. **Southern Forests**, v. 74, n. 4, p. 229 – 235, 2012.

GOMES, F. P. **Curso de Estatística Experimental**. 13 ed. Piracicaba: Nobel, ESALQ/USP, 1990, 240 p.

GOMIDE, L. R.; MELLO, J. M. de.; ARCEBI JÚNIOR, F. W.; SCOLFORO, J. R. S. Automated selective thinning via multicriteria metaheuristic procedure. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 102, p. 299 – 306, 2014.

HAN, H.; LEE, H.; JOHNSON, L. Economic feasibility of an integrated harvesting system for small diameter trees in southwest Idaho. **Forest Products Journal**, LaGrange, v. 54, n. 2, p. 21 – 27, 2004.

HAN, S.; HAN, H.; PAGE-DUMROESE, D. S.; JOHNSON, L. R. Soil compactation associated with cut-to-length and whole-tree harvesting of a coniferous forest. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 39, n. 5, p. 976 – 989, 2009.

HARMS, W. R.; WHITESELL, C. D.; DeBELL, D. S. Growth and development of loblolly pine in a spacing trial planted in Hawaii. **Forest Ecology and Management**, Amsterdã, v. 126, p. 13-14, 2000.

HARSTELA, P. **Work studies in forestry**. Juensuu (Finland): Faculty of Forestry, University of Joensuu, 1991.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório 2017**. Brasil: Indústria Brasileira de Árvores, 2017, 80 p.

JIROUŠEK, R.; KLVAČ, R.; SKOUPÝ, A. Productivity and costs of the mechanised cut-to-length wood harvesting system in clear-felling operations. **Journal of Forest Science**, v. 53, n. 10, p. 476 – 482, 2007.

KANAWATY, G. **Introduction to Work Study**. 4th Ed. Geneva: International Labour Organization, 1992. 524 p.

KELLOGG, L. D.; BETTINGER, P. Thinning productivity and cost for a mechanized cut-to-length system in the Northwest Pacific Coast Region of the USA. **Journal of Forest Engineering**, v. 5, n. 2, p. 43 – 52, 1994.

KOETZE, H.; MALAN, F. Further progress in the development of prediction models for growth and wood quality of plantation-grown *Pinus patula* sawtimber in South Africa. In: DYKSTRA, D.; MONSERUD, R. A. (Ed.) **Forest growth and timber quality: crown models and simulation methods for sustainable Forest Management**. Portland: USDA Forest Service, 2009. p. 113 - 123. (General Technical Report PNW GRT 791).

KOHLER, S. V.; HOEHLER, H. S.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARCE, J. E.; MACHADO, S. A. Evolução do sortimento em povoamentos de *Pinus taeda* nos estados do Paraná e Santa Catarina. **Floresta**, Curitiba, v. 45, n. 3, p. 545 - 554, 2015.

KRONKA, F. J. N.; BERTOLANI, F.; PONCE, R. H. **A cultura do Pinus no Brasil**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2005. 158 p.

KULAK, D.; STANCZYKIEWICZ, A.; SZEWCZYK, G. Productivity and time consumption of timber extraction with a grapple skidder in selected pine stands. **Croatian Journal of Forest Engineering**, Zagreb, v. 38, n. 1, p. 55 – 63, 2017.

KURTZ, V. D.; FERRUCHI, M. R. **Poda Florestal**. Misiones, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuária, 2004. 16 p. (Cartilla Técnica, n. 2).

LABELLE, E. R.; SOUCY, M.; CYR, A.; PELLETIER, G. Effect of tree form on the productivity of a cut-to-length harvester in a hardwood dominated stand. **Croatian Journal of Forest Engineering**, v. 37, n. 1, p. 175 – 183, 2016.

LACERDA, L. C.; FIEDLER, N. C.; CHICHORRO, J. F.; MINETTE, L. J.; CARMO, F. C. A. Analysis of the production capacity from a harvester in the forest in own and outsourced modules. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 41, n. 1, p. 1 – 7, 2017.

LAGESON, H. Effects of thinning type on the *Harvester* productivity and on the residual stand. **International Journal of Forest Engineering**, Umea, v.8, n.2, p.7-14, 1997.

LEITE, E. S.; FERNANDES, H. C.; GUEDES, I. L.; AMARAL, E. J. Análise técnica e de custos do corte florestal semimecanizado em povoamentos de eucalipto em diferentes espaçamentos. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 3, p. 637 – 643, 2014.

LIGNÉ, D.; ELIASSON, L.; NORDFJELL, T. Time consumption and damage to the remaining stock in mechanised and motor manual Pre-commercial Thinning. **Silva Fennica**, Helsinki, v. 39, n. 3, p. 455 - 464, 2005.

LIMA, R. **Crescimento, biomassa e carbono de *Pinus taeda* L. em função do espaço vital**. 2014. 119 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

LINHARES, M.; SETTE JÚNIOR, C. R.; CAMPOS, F.; YAMAJI, F. M. Eficiência e desempenho operacional de máquinas harvester e forwarder na colheita florestal. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 42, n. 2, p. 212 – 219, 2012.

LISITA, A.; LEITE, H. G.; CAMPOS, J. C. C.; REGAZZI, A. J.; LELLIS, V. G. S. Efeitos de reespaçamentos na produção, no diâmetro médio e na estrutura de *Eucalyptus camaldulensis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 21, n. 4, p. 473 – 482, 1997.

LOPES, E. S. L. Avaliação técnica e econômica do corte de madeira de pinus com cabeçote *harvester* em diferentes condições operacionais. **Floresta**, Curitiba, v. 37, n. 3, 2007.

LOPES, E. S.; CRISTO, J. F. C.; PIEPER, M. Avaliação técnica de um sistema de pesagem no carregamento florestal. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 4, p. 575 – 581, 2006.

LOPES, E. S.; CRUZINIANI, E.; DIAS, A. N.; FIEDLER, N. C. Avaliação técnica e econômica do corte de madeira de pinus com cabeçote *harvester* em diferentes condições operacionais. **Floresta**, Curitiba, v. 37, n. 3, p. 305 – 313, 2007.

LOPES, E. S.; DINIZ, C. C. C.; SERPE, E. L.; CABRAL, O. M. J. V. Efeito do sortimento na produtividade e custo do forwarder no desbaste comercial de *Pinus taeda*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 109, p. 57 – 66, 2016.

LOPES, E. S.; FERNANDES, H. C.; MACHADO, C. C.; RINALDI, P. C. N.; SILVEIRA, J. C. M. Compactação de um latossolo submetido ao tráfego do “Clambunk”. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 72, p. 23 – 28, 2006.

LOPES, E. S.; OLIVEIRA, D.; RODRIGUES, C. K.; DRINKO, C. H. Variables influencing working time and skidder productivity in wood extraction. **Nativa**, Sinop, v. 5, n. 4, p. 298 – 302, 2017.

MACHADO C. C.; LOPES E. S. Análise da influência do comprimento de toras de eucalipto na produtividade e custo da colheita e transporte florestal. **Cerne**, Lavras, v. 6, n. 2, p. 124-129, 2000.

MACHADO, C. C. **Exploração florestal**, 6. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Imprensa Universitária, 1989. 34 p.

MACHADO, C. C. **Exploração Florestal**. 4° edição. Viçosa: UFV, Imprensa Universitária, 1985. 60 p.

MACHADO, C. C.; MALINOVSKI, J. R. **Ciência do trabalho florestal**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1988. 65 p.

MACHADO, C. C.; SILVA, E. N.; PEREIRA, R. S.; CASTRO, G. P. O setor florestal brasileiro e a colheita florestal. In: MACHADO, C. C. **Colheita florestal**. 3° edição. Viçosa: UFV, 2014. p. 15 - 45.

MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. 2° edição. Guarapuava: UNICENTRO, 2014. 316 p.

MAGAGNOTTI, N.; KANZIAN, C. SCHULMEYER, F.; SPINELLI, R. A new guide for work studies in forestry. **International Journal of Forest Engineering**, Umea, v. 24, n. 3, p. 249 – 253, 2013.

MAGAGNOTTI, N.; NATI, C.; PARI, L.; SPINELLI, R.; VISSER, R. Assessing the cost of stump-site debarking in eucalypt plantations. **Biosystems Engineering**, v. 110, n. 4, p. 443 – 449, 2011.

MAGAGNOTTI, N.; PARI, L.; SPINELLI, R. Use, Utilization, Productivity and Fuel Consumption of Purpose-Built and Excavator-Based Harvesters and Processors in Italy. **Forests**, Basel, v. 8, n. 485, p. 1-12, 2017.

MAGAGNOTTI, N.; SPINELLI, R. **Good Practice Guidelines for Biomass Production Studies**. Sesto Fiorentino: CNR IVALSÀ, 2012. 52 p.

MAINARDI, G. L.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. Produção de *Pinus taeda* L. na região de Cambará do Sul, RS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.6, n.1, p. 39 - 52, 1996.

MALINOVSKI, J. R.; CAMARGO, C. M. S.; MALINOVSKI, R. A. Sistemas. In: MACHADO, C. C. **Colheita florestal**. 1° edição. Viçosa: UFV, 2002. p. 145 - 167.

MALINOVSKI, J. R.; CAMARGO, C. M. S.; MALINOVSKI, R. A.; MALINOVSKI, R. A.; CASTRO, G. P. Sistemas. In: MACHADO, C. C. **Colheita florestal**. 3° edição. Viçosa: UFV, 2014. p. 178 – 205.

MALINOVSKI, R. A.; MALINOVSKI, R. A.; MALINOVSKI, J. R.; YAMAJI, F. M. Análise das variáveis de influência na produtividade das máquinas de colheita de madeira em função das características físicas do terreno, do povoamento e do planejamento operacional florestal. **Floresta**, Curitiba, v. 36, n. 2, p. 169 – 182, 2006.

MANNER, J.; NORDFJELL, T.; LINDROOS, O. Effects of the number of assortments and log concentration on time consumption for forwarding. **Silva Fennica**, Helsinki, v. 47, n. 4, p. 1 – 19, 2013.

MIYATA, E. S. **Determining fixed and operating costs of logging equipment**. St. Paul, Minnesota: USDA Forest Service - Department of Agriculture, 1980. 16 p.

MURPHY, G. Determining sample size for harvesting cost estimation. **New Zealand Journal of Forestry Science**, Rotorua, v. 35, n. 1/2, p. 166 - 169, 2005.

NAKAGAWA, M.; HAYASHI, N.; NARUSHIMA, T. Effect of tree size on time of each work element and processing productivity using an excavator-based single-grip harvester or processor at a landing. **Journal of Forest Research**, v. 15, n. 4, p. 226-233, 2010.

NASCIMENTO, A. C.; LEITE, A. M. P.; SOARES, T. S.; FREITAS, L. C. Avaliação técnica e econômica da colheita florestal com *feller buncher*. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 1, p. 9-15, 2011.

NORIIHIRO, J.; ACKERMAN, P.; SPONG, B. D.; LÄNGIN, D. Productivity model for cut-to-length harvester operation in South African eucalyptus pulpwood plantations. **Croatian Journal of Forest Engineering**, v. 39, n. 1, p. 1 – 13, 2018.

NOVACK JUNIOR, N. S. **Critérios técnicos para regimes de poda em *Pinus taeda* L. visando produção de madeira livre de nós**. 2018. 75 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2018.

NOVAES, D. M. **Modelagem de crescimento e produção de povoamentos de *Tectona grandis* L.f. a partir de análise de tronco**. 2009. 52 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal Viçosa, 2009.

NURMINEM, T.; KORPUNEM, H. UUSITALO, J. Time consumption analysis of the mechanized cut-to-length system. **Silva Fennica**, Helsinki, v. 40, n. 2, p. 335 – 363, 2006.

OIKARI, M.; KÄRHÄ, K.; PALANDER, T.; PAJUOJA, H.; OVASKAINEN, H. Analyzing the views of wood harvesting professionals related to the approaches for increasing the cost-efficiency of wood harvesting from young stands. **Silva Fennica**, Helsinki, v. 44, n. 1, p. 481 – 495, 2010.

OLIVEIRA JUNIOR, E. D.; SEIXAS, F. Análise energética de dois sistemas mecanizados na colheita do eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 70, p. 49 – 57, 2006.

OLIVEIRA, D. **Análise operacional e custos de sistemas de colheita de madeira em povoamentos de eucalipto**. 2013. 116 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, 2013.

OLIVEIRA, D.; LOPES, E. S.; FIEDLER, N. C. Avaliação técnica e econômica do *forwarder* na extração de toras de pinus. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 37, n. 84, p. 525 – 533, 2009.

OLSEN, E.; HOSSAIN, M.; MILLER, M. **Statistical comparison of methods used in harvesting work studies**. Corvallis (OR): Oregon State University, Forest Research Laboratory. Research Contribution, n. 23, 1998. 31 p.

PANDOLFO, C.; BRAGA, H.J.; SILVA JÚNIOR, V.P.; MASSIGNAN, A.M.; PEREIRA, E.S.; THOMÉ, V.M.R. **Atlas climatológico digital do Estado de Santa Catarina**. Florianópolis: EPAGRI, 2002. CR-Rom.

PEREIRA, A. L. N.; LOPES, E. S.; DIAS, A. N. Análise técnica e de custo do *feller buncher* e *skidder* na colheita de madeira em diferentes produtividades do povoamento. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 4, p. 981 – 989, 2015.

PEREIRA, R. S.; GUIMARÃES, P. B. R.; DEL MENEZZI, C. H. S.; VALE, A. T.; ROBERT, R. C. G. Avaliação da segurança e ocorrência de defeitos na operação de corte semimecanizado de florestas de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 3, p. 511 – 518, 2012.

PEZZUTTI, R. V.; FLEIG, F. D.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R. Estudo e modelagem do crescimento em diâmetro de povoamentos de *Pinus taeda* L.

submetidos a podas e desbastes na Argentina. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 4, p. 1225 – 1237, 2016.

PRETZSCH, H. **Forest Dynamics, Growth and Yield**. Berlin: Springer-Verlag, 2009. 663 p.

PULKKI, R. E. **Forest Harvesting I: On the Procurement of Wood with Emphasis on Boreal and Great Lakes St. Lawrence Forest Regions**. 2001. 156 p.

PURFÜST, F. T.; ERLER, J. The human influence on productivity in harvester operations. **International Journal of Forest Engineering**, v. 22, n. 2, p. 15 – 22, 2011.

R CORE TEAM (2016). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 49 – 134.

RIBEIRO, N.; SITOÉ, A.; GUEDES, B.; STAISS, C. **Manual de silvicultura tropical**. Maputo: Universidade Eduardo Mondlane, 2002. 123 p.

RIU, N. **Cultivo de Pinus**. Buenos Aires: Cátedra de Dasonomia, 2011. 9 p.

ROBERT, R. C. G. **Análise técnica e econômica de um sistema de colheita mecanizada em plantios de *Eucalyptus* spp. em duas condições de relevo acidentado**. 2013. 112 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, 2013.

ROBERT, R. C. G.; TESSARO, F.; PEREIRA, R. S.; SAMPIETRO, J. A.; MALINOVSKI, R. A. Technical analysis of extraction operation performed by a forwarder with traction aid winch in an *Eucalyptus* spp. plantation. **Nativa**, Sinop, v. 5, n. 4, p. 290 – 297, 2017.

ROCHA, E. B.; FIEDLER, N. C.; ALVES, R. T.; LOPES, E. S.; GUIMARÃES, P. P.; PERONI, L. Produtividade e custos de um sistemas de colheita de árvores inteiras. **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 3, p. 372 – 381, 2009.

RODRIGUES, C. K.; LOPES, E. S.; FIGUEIREDO FILHO, A.; CÂNDIDO, M. K. Modeling of forwarder productivity and costs in thinned pine stands. **Floresta**, Curitiba, v. 48, n. 2, p. 285 – 292, 2018.

RODRIGUES, C. K.; LOPES, E. S.; FIGUEIREDO FILHO, A.; SILVA, D. A. Modelagem da biomassa residual da colheita de madeira em povoamentos submetidos ao desbaste com harvester. **Biofix Scientific Journal**, Curitiba, v. 2, n. Especial I MECFOR, p. 1 – 5, 2017.

ROLLINSON, T. J. D. Respacing sitka spruce. **Forestry**, Oxford, v. 61, n. 1, p. 11 – 21, 1988.

RUMMER, R.; KLEPAC, J. Mechanized or hand operations: which is less expensive for small timber? In: SMALL DIAMETER TIMBER: RESOURCE MANAGEMENT, MANUFACTURING, AND MARKETS, 2002, Spokane – Washington. **Proceedings...** Spokane: Washington State University Cooperative Extension, 2002. p. 183 – 189.

RYAN, T.; PHILLIPS, H.; RAMSAY, J.; DEMPSEY, J. **Forest Road Manual: Guidelines for the design, construction and management of forest roads**. Dublin: COFORD, 2004. 170 p.

SAMSET, I. Some observations on time and performance studies in forestry. **Communications of the Norwegian Forest Research Institute**, Ås – Norway, v. 43, n. 5, 1 – 80, 1990.

SANQUETTA, M. N. I.; SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; RODRIGUES, A. L.; MAAS, G. C. B. Contribuição de um segundo diâmetro na estimação de volume individual de plantios jovens de *Tectona grandis* L.f. **Revista Agro@ambiente On-Line**, Boa Vista, v. 9, n. 4, p. 446 – 454, 2015.

SANTOS, C. **Estatística Descritiva - Manual de Autoaprendizagem**. Lisboa: Edições Silabo, 2007.

SANTOS, P. H. A.; SOUZA, A. P.; MARZANO, F. L. C.; MINETTE, L. J. Produtividade e custos de extração de madeira de eucalipto com clambunk skidder. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 511-518, 2013.

SCHETTINO, S. **Precarização do trabalho: riscos e agravos à saúde e segurança ocupacional dos trabalhadores na colheita florestal em propriedades rurais**. 2016. 116 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

SCHULTZ, R. P. **Loblolly pine: the ecology and culture of loblolly pine** (*Pinus taeda* L.). Washington, DC: USDA, Forest Service, 1997. 493 p. (Agricultural Handbook, 713).

SCOPURSKI, A. J.; OLIVEIRA, F. M.; DINIZ, C. C. C.; LOPES, E. S. Produtividade do processamento da madeira de pinus nos sistemas full-tree e cut to length em diferentes volumes individuais. **Biofix Scientific Journal**, Curitiba, v. 2, n. Especial I MECFOR, p. 12 – 15, 2017.

SEIXAS, F.; BATISTA, J. L. F. Comparação técnica e econômica entre *harvesters* de pneus e com máquina base de esteiras. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 185 – 191, 2014.

SEIXAS, F.; CASTRO, G. P. Extração. In: MACHADO, C.C. **Colheita florestal**. 3° ed. Viçosa: UFV, 2014. p. 106 – 161.

SEIXAS, F.; OLIVEIRA JÚNIOR, E.D. Compactação do solo devido ao tráfego de máquinas de colheita de madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.60, p.73–87, 2001.

SERPE, E. L.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARCE, J. E. Perdas volumétricas relativas à colheita florestal e seus reflexos econômicos. **Biofix Scientific Journal**, Curitiba, v. 3, n. 1, p. 172 – 176, 2018.

SILVA, E. N.; MACHADO, C. C.; MINETTE, L. J.; SOUZA, A. P. S.; FERNANDES, H. C.; SILVA, M. L.; JACOVINE, L. A. Avaliação técnica e econômica do corte mecanizado de *Pinus sp.* com harvester. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 4, p. 745 – 753, 2010.

SIMÕES, D.; FENNER, P. T.; ESPERANCINI, M. S. T. Avaliação técnica e econômica da colheita de florestas de eucalipto com harvester. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 88, p. 611 – 618, 2010.

SIMÕES, D.; MARCELINO, F. A.; FENNER, P. T. Rendimentos e custos operacionais de dois modelos de carregadores florestais. **Magistra**, Cruz das Almas, v. 24, n. 1, p. 63 – 69, 2012.

SMITH, D. M.; LARSON, B. C.; KELTY, M. J.; ASHTON, P. M. S. **The practice of silviculture: applied forest ecology**. 1997, 537 p.

SOUZA, A. P. de.; DUTRA, R. B. C.; MINETTE, L. J.; MARZANO, F. L. C.; SCHETTINO, S. Metas de produção para trabalhadores de corte florestal. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 39, n. 4, p. 713 – 722, 2015.

SOUZA, D. V.; OLIVEIRA, T. W. G.; PIVA, L. R. O.; SANTOS, J. X.; SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P. **Introdução ao R: aplicações florestais**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2018a.

SOUZA, F. L.; SAMPIETRO, J. A.; DACOREGIO, H. M.; SOARES, P. R. C.; LOPES, E. S.; QUADROS, D. S. Densidade ótima e aceitável de estradas na colheita de pinus no sistema de toras curtas e árvores inteiras. **Scientia forestalis**, Piracicaba, v. 46, n. 118, p. 189 – 198, 2018b.

SPINELLI R.; LOMBARDINI C.; MAGAGNOTTI N. The effect of mechanization level and harvesting system on the thinning cost of Mediterranean softwood plantations. **Silva Fennica**, Helsinki, v. 48, n. 1, p. 1 – 15, 2014.

SPINELLI, R. **Harvesting of Thinnings**. Florence: National Council for Research, Timber and Tree Institute, 2004, 6 p.

SPINELLI, R.; HARTSOUGH, B.; MAGAGNOTTI, N. Productivity Standards for Harvesters and Processors in Italy. **Forest Products Journal**, LaGrange, v. 60, n. 3, p. 226 – 235, 2010.

SPINELLI, R.; LAINA-RELANO, R.; MAGAGNOTTI, N.; TOLOSANA, E. Determining observer and method effects on the accuracy of elemental time studies in forest operations. **Baltic Forestry**, v. 19, n. 2, p. 301 – 306, 2013.

SPINELLI, R.; MAGAGNOTTI, N. Comparison of two harvesting systems for the production of forest biomass from the thinning of *Picea abies* plantations. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 25, n. 1, p. 69 – 77, 2010.

SPINELLI, R.; OWENDE, P. M. O.; WARD, S. Productivity and cost of CTL harvesting of *Eucalyptus globulus* stands using excavator-based harvesters. **Forest Products Journal**, LaGrange, v. 52, n. 1, p. 67 – 77, 2002.

SPINELLI, R.; VISSER, R. Analyzing and estimating delays in harvester operations. **International Journal of Forest Engineering**, Umea, v. 19, n. 1, p. 36 – 41, 2008.

STRANDGARD, M.; MITCHELL, R. Automated time study of forwarders using GPS and vibration sensor. **Croatian Journal of Forest Engineering**, v. 36, n. 2, p. 175 – 184, 2015.

STRANDGARD, M.; MITCHELL, R.; ACUNA, M. Time consumption and productivity of a forwarder operating on a slope in a cut-to-length harvest system in a *Pinus radiata* D. Don pine plantation. **Journal of Forest Science**, v. 63, n. 7, p. 324 – 330, 2017.

STRANDGARD, M.; WALSH, D.; ACUNA, M. Estimating harvester productivity in *Pinus radiata* plantations using StanForD stem files. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 28, n. 1, p. 73 – 80, 2013.

SUNDBERG, U. The emergence and establishment of forest operations and techniques as a discipline in forest science. **Communications of the Norwegian Forest Research Institute**, Ås – Norway, v. 41, n. 8, p. 107 – 137, 1988.

SYUNEV, V. SOKOLOV, A.; KONOVALOV, A. KATAROV, V.; SELIVERSTOV, A.; GERASIMOV, Y.; KARVINEN, S. VÄLKKY, E. **Comparison of wood harvesting methods in the Republic of Karelia**. Vanta: Finnish Forest Research Institute, 2009, 117 p.

TERVO, K.; PALMROTH, L.; KOIVO, H. Skill evaluation of human operators in partly automated mobile working machines. **IEE Transactions on Automation Science and Engineering**, v. 7, n. 1, p. 133 – 142, 2010.

TIERNAN, D.; ZELEKE, G.; OWENDE, P. M. O; KANALI, C. L.; LYONS, J.; WARD, S. M. Effect of working conditions on forwarder productivity in cut-to-length timber harvesting on sensitive forest sites in Ireland. **Biosystems Engineering**, v. 87, n. 2, p. 167 – 177, 2004.

TOLOSANA, E.; SPINELLI, R.; AMINTI, G. LAINA, R.; LÓPEZ-VICENS, I. Productivity, efficiency and environmental effects of whole-tree harvesting in Spanish coppice stands using a drive-to-tree disc saw feller-buncher. **Croatian Journal of Forest Engineering**, v. 39, n. 2, p. 163 – 172, 2018.

TUKEY, J. W. **Exploratory data analysis**. 1 ed. Massachusetts: Reading, 1977.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). **Plants Database**. 2013. Disponível em:

https://plants.usda.gov/core/profile?symbol=PITA&photoID=pita_037_avp.tif. Acesso em: 08 jan. 2018.

VISSER, R.; SPINELLI, R. Determining the shape of the productivity function for mechanised felling and fellingprocessing. **Journal of Forest Research**, v. 17, n. 5, p. 397 – 402, 2012.

WADOUSKI, L. H. O planejamento operacional na exploração de florestas. In: SIMPÓSIO SOBRE EXPORAÇÃO, TRANSPORTE, ERGONOMIA E SEGURANÇA EM REFLORESTAMENTOS, 1987, Curitiba. **Anais...** Curitiba: FUPEF. 1987. P. 28 – 39.

WALMSLEY, J. D.; JONES, D. L.; REYNOLDS, B.; PRICE, M. H.; HEALEY, J. R. Whole tree harvesting can reduce second rotation forest productivity. **Forest Ecology and Management**, Amsterdã, v. 257, p. 1104 – 1111, 2009.

WALSH, D.; STRANDGARD, M. Productivity and cost of harvesting a stemwood biomass product from integrated cut-to-length harvest operations in Australian *Pinus radiata* plantations. **Biomass and Bioenergy**, v. 66, p. 93 – 102, 2014.

WEST, P. W. **Growing plantation forestry**. Australia: Springer, 2006. 320 p.

ZAGONEL, R. **Análise da sensibilidade ótima de estradas de uso florestal em relevo plano de áreas com produção de Pinus taeda**. 2005. 108 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.