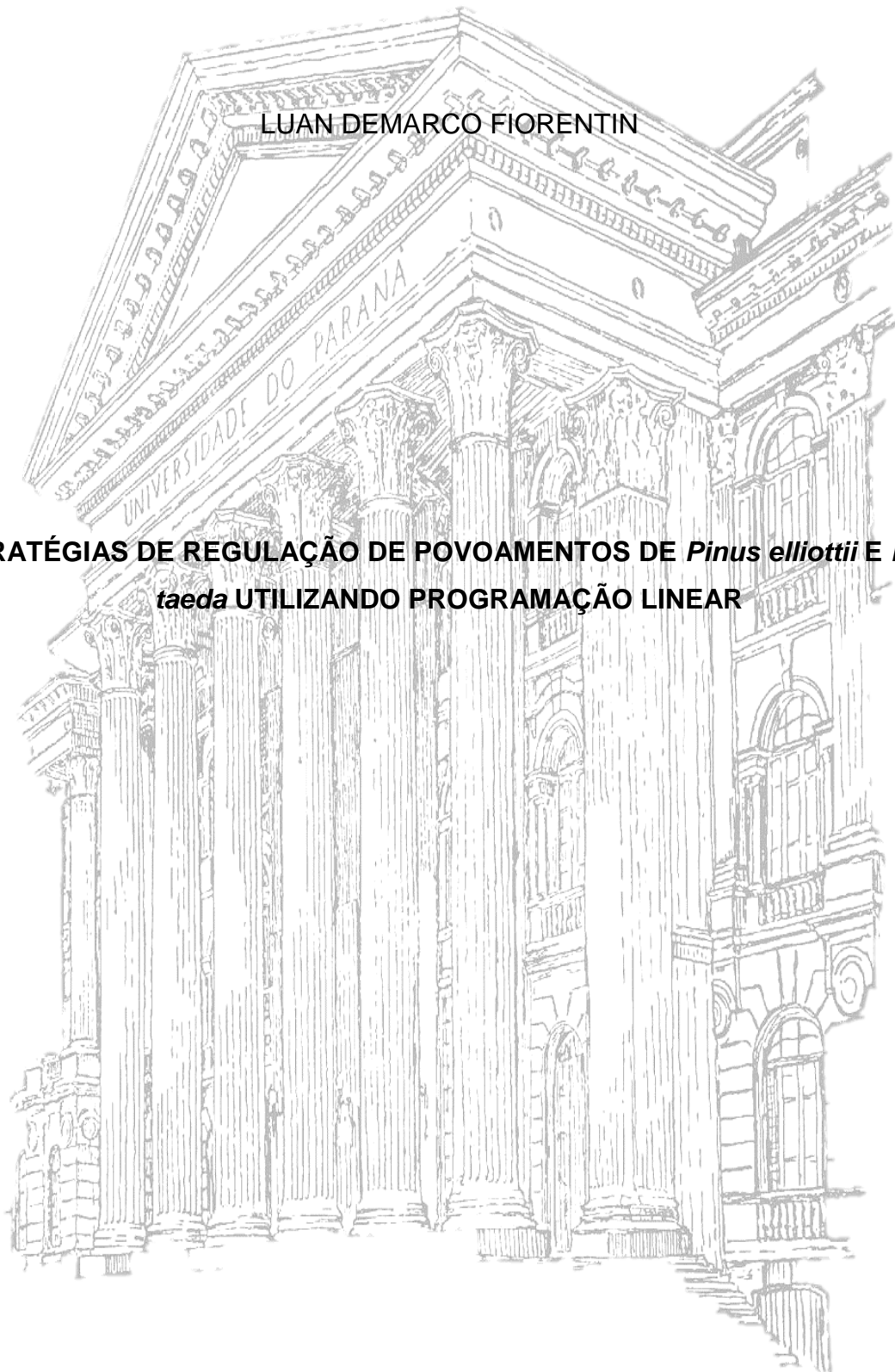


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUAN DEMARCO FIORENTIN

ESTRATÉGIAS DE REGULAÇÃO DE POVOAMENTOS DE *Pinus elliottii* E *Pinus taeda* UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO LINEAR



CURITIBA

2016

LUAN DEMARCO FIORENTIN

ESTRATÉGIAS DE REGULAÇÃO DE POVOAMENTOS DE *Pinus elliottii* E *Pinus taeda* UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO LINEAR

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Dr. Julio Eduardo Arce

Co-orientador: Dr. Afonso Figueiredo Filho

CURITIBA

2016

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

Fiorentin, Luan Demarco

Estratégias de regulação de povoamentos de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*
utilizando programação linear / Luan Demarco Fiorentin. – Curitiba, 2016
90 f. : il.

Orientador: Dr. Julio Eduardo Arce

Coorientador: Dr. Afonso Figueiredo Filho

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências
Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa:
Curitiba, 19/02/2016.

Área de concentração: Manejo Florestal.

1. Manejo florestal. 2. *Pinus elliotti*. 3. *Pinus taeda*. 4. Programação linear. 5.
Teses. I. Arce, Julio Eduardo. II. Figueiredo Filho, Afonso. III. Universidade
Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. IV. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.61

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 Dissertação de Mestrado de **LUAN DEMARCO FIORENTIN**, intitulada: "**ESTRATÉGIAS DE REGULAÇÃO DE POVOAMENTOS DE PINUS ELLIOTTII E PINUS TAEDA UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO LINEAR**", após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO.

Curitiba, 19 de Fevereiro de 2016.



Prof JULIO EDUARDO ARCE (UFPR)
(Presidente da Banca Examinadora)



Prof ALLAN LIBANIO PELISSARI (UFPR)



Prof EDILSON BATISTA DE OLIVEIRA (EMBRAPA)



AGRADECIMENTOS

Agradeço sobretudo aos meus pais, Amarildo Moacir Fiorentin e Angela Maria Demarco Fiorentin, e ao meu irmão, Lucas Demarco Fiorentin, pelo constante apoio ao longo desses dois anos de mestrado e pelos conselhos quando necessários, os quais foram sempre fundamentais nessa jornada.

À Thais Wisniewski, pelo companheirismo e apoio incondicional em todos os momentos. À toda minha família, mas em especial aos meus avós, que sempre estão presentes em todos os momentos, me passando confiança.

Ao professor Julio Eduardo Arce, por ter aceitado ser meu orientador e contribuindo com importantes informações para o desenvolvimento desta dissertação. Ao professor Afonso Figueiredo Filho, por aceitar ser meu co-orientador. Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, em especial ao Sebastião do Amaral Machado e Sylvio Péllico Netto, pelo auxílio nas dúvidas sempre que necessário e os cafezinhos sempre com boas histórias.

Aos meus amigos de Pós-Graduação, em especial aos que sempre estão presentes no “Laboratório de Manejo”, Allan Pelissari, Alexandre Behling, Ângelo Ebling, Hassan David, Pedro Henrique, Rodrigo Geroni, Saulo Téo e Sintia Kohler. Ao Rodrigo Miranda, pelos “papos futebolísticos”, as conversas sobre manejo florestal e parceria nesses dois anos, juntamente com a Izabele Domingues.

À empresa Juliana Florestal, em especial ao Reinaldo Hoinacki, por ter prontamente fornecido os dados para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos amigos de longa data e que, de uma forma ou outra, sempre estão presentes, em especial ao Junior Ferrari, Karine Chiarello, Nikoli Krahl e Ray Zat.

*“Uma mente necessita de livros da
mesma forma que uma espada necessita
de uma pedra de amolar se quisermos
que ela se mantenha afiada”*

George R. R. Martin

RESUMO

O cultivo do *Pinus* é uma alternativa importante para suprir a demanda de madeira e proteger as florestas nativas no Sul do Brasil. Porém, planejar o uso sustentável desses recursos ao longo do tempo é uma atividade que requer aplicações de procedimentos matemáticos de simulação e otimização florestal. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo principal regular a estrutura volumétrica de povoamentos de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* utilizando programação linear. O banco de dados utilizado nessa pesquisa foi obtido a partir do inventário florestal contínuo da empresa Juliana Florestal, localizada em Caçador, estado de Santa Catarina, Brasil. Inicialmente, quatro modelos de regressão não linear foram ajustados para classificar os sítios dos povoamentos de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, por meio da altura dominante. As curvas de índices de sítio foram avaliadas pelo teste de anamorfismo, para verificar a relação entre os índices de sítio e as alturas dominantes médias nas diferentes idades. Posteriormente, o modelo polinomial de 5º Grau foi ajustado para estimar o volume dos sortimentos florestais. O teste L&O foi aplicado para verificar a identidade das estimativas de volume total provenientes do método sem agrupamento (ajuste por idade) e com agrupamento (ajuste geral) dos dados. Para regular a estrutura dos povoamentos de *Pinus* spp. foram desenvolvidos e analisados quatro modelos de otimização: 1) maximização da produção volumétrica dos sortimentos; 2) maximização do valor presente líquido dos sortimentos; 3) minimização da oscilação da produção anual máxima e mínima dos sortimentos; 4) e minimização dos desvios absolutos da produção dos sortimentos entre anos consecutivos. Os diferentes cenários de programação linear descritos foram resolvidos pelo *software* OpTimber-LP®, que utilizou o SisPinus® para simular os regimes de manejo e o LINGO® para otimizar. O modelo de Bailey de 4 Parâmetros apresentou desempenho superior na classificação de sítios dos povoamentos de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*. As curvas de índices de sítio resultaram em padrão anamórfico para as duas espécies. O polinômio de 5º Grau ajustado com os dados não agrupados (ajuste por idade) proporcionou estatísticas superiores para estimativa do volume total. O teste L&O indicou que as estimativas de volume total foram estatisticamente diferentes entre os métodos testados, mas essas diferenças foram muito pequenas e, dessa forma, optou-se pelo modelo geral (com agrupamento). Os modelos de otimização testados foram capazes de regular a estrutura volumétrica dos povoamentos de *Pinus* spp. Os regimes de manejo otimizado na função objetivo que minimiza os desvios absolutos da produção dos sortimentos entre anos consecutivos, para evitar possíveis problemas operacionais.

Palavras-chave: Classificação de sítios. Função de afilamento. Sortimento. Pesquisa operacional. Otimização.

ABSTRACT

Pinus cultivation is an important alternative to supply the wood demand and to protect the native forests at Southern Brazil. However, planning the sustainable use of these resources throughout the time is an activity that requires mathematic procedures applications of forest simulation and optimization. In these context, the present study aimed to regulate the volumetric structure of the *Pinus elliottii* and *Pinus taeda* stands using linear programming. The database used in these research was obtained from continuous forest inventory of Juliana Florestal company, located at Caçador, Santa Catarina state, Brazil. Initially, four nonlinear regression models were fitted to classify the sites of the *Pinus elliottii* and *Pinus taeda* stands, by dominant height. The site index curves were evaluated by anamorphism test to verify the relation between site index and average dominant height at different ages. Posteriorly, the 5° Degree polynomial model was fitted to estimate the forests assortments volume. L&O test was applied to verify the identity of the total volume estimates from the without data grouping (fit by age) and with data grouping (general fit) method. To regulate the structure of the *Pinus* spp. stands four optimization models were developed and analyzed: 1) maximization of the assortments volumetric production; 2) maximization of the assortments net present value; 3) minimization of the assortments maximum and minimum annual production oscillation; 4) and minimization of the assortments absolute deviations production between consecutives ages. The different scenarios of linear programming described were solved by OpTimber-LP® software, that used the SisPinus® to simulate management alternatives and the LINGO® to optimize. The Bailey of 4 Parameters model showed superior performance in the site classification of the *Pinus elliottii* and *Pinus taeda* stands. Site index curves resulted in anamorphic patterns for both species. The 5° Degree polynomial fitted without data grouping (fit by age) provided higher statistics for total volume estimates. L&O test indicated the total volume estimates were statistically different between the methods tested, but the differences were very small and, thus, we adopted by general model (with grouping). Optimization models tested were able to regulate the volumetric structure of the *Pinus* spp. stands. The management activities optimized in the objective function that minimize the assortments maximum and minimum annual production oscillation to prevent possible operational problems.

Keywords: Site classification. Taper function. Assortment. Operational Research. Optimization.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – CONSUMO DOMÉSTICO E EXPORTAÇÃO DE MADEIRA SERRADA (ADAPTADO DE IBÁ, 2014)	17
FIGURA 2 – ESTRUTURA HIERÁRQUICA DO PLANEJAMENTO FLORESTAL (ADAPTADO DE MITCHELL 2004)	19
FIGURA 3 – ESTRUTURA DE UMA HIPOTÉTICA FLORESTA REGULADA.....	21
FIGURA 4 – LOCALIZAÇÃO DAS UNIDADES DE MANEJO NATIVAS E PLANTADAS DA EMPRESA JULIANA FLORESTAL	27
FIGURA 5 – GRÁFICOS BOXPLOT DA ALTURA DOMINANTE EM DIFERENTES IDADES DE <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i> , NA REGIÃO DE CAÇADOR, SC	44
FIGURA 6 – DISPERSÃO DOS RESÍDUOS PARA OS MODELOS TESTADOS NA CLASSIFICAÇÃO DE SÍTIOS DE <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i> , NA REGIÃO DE CAÇADOR, SC	47
FIGURA 7 – CURVAS DE ÍNDICE DE SÍTIO PARA <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i> , NA REGIÃO DE CAÇADOR, SC	48
FIGURA 8 – RELAÇÃO LINEAR ENTRE ÍNDICE DE SÍTIO E ALTURA DOMINANTE EM DIFERENTES IDADES DE <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i> , NA REGIÃO DE CAÇADOR, SC..	52
FIGURA 9 – COEFICIENTE ANGULAR EM DIFERENTES IDADES DE <i>Pinus elliottii</i> e <i>taeda</i> , NA REGIÃO DE CAÇADOR, SC.....	53
FIGURA 10 – GRÁFICOS DE DISPERSÃO DE RESÍDUOS DA FUNÇÃO DE AFILAMENTO TESTADA PARA ESTIMAR OS DIÂMETROS DE <i>Pinus spp.</i> , COM E SEM AGRUPAMENTO DOS DADOS, NA REGIÃO DE CAÇADOR, SC.....	58
FIGURA 11 – GRÁFICOS DE DISPERSÃO DE RESÍDUOS DA FUNÇÃO DE AFILAMENTO TESTADA PARA ESTIMAR O VOLUME TOTAL COM CASCA DE <i>Pinus spp.</i> , COM E SEM AGRUPAMENTO DOS DADOS, NA REGIÃO DE CAÇADOR, SC	64
FIGURA 12 – RELAÇÃO LINEAR ENTRE AS ESTIMATIVAS OBTIDAS NO MÉTODO SEM AGRUPAMENTO E NO MÉTODO COM AGRUPAMENTO, PARA AS VARIÁVEIS DIÂMETRO E VOLUME TOTAL COM CASCA DE <i>Pinus spp.</i> , NA REGIÃO DE CAÇADOR, SC	66
FIGURA 13 – DISTRIBUIÇÃO DA ÁREA DE PLANTIO E DO VOLUME DE <i>Pinus spp.</i> POR IDADE.....	67
FIGURA 14 – PORCENTAGEM DE ÁREA DOS POVOAMENTOS DE <i>Pinus spp.</i> POR REGIME DE MANEJO E PARA CADA FUNÇÃO OBJETIVO.....	70
FIGURA 15 – ATIVIDADES SILVICULTURAIS REALIZADAS NOS POVOAMENTOS DE <i>Pinus spp.</i> , PARA CADA FUNÇÃO OBJETIVO	72
FIGURA 16 – PRODUÇÃO TOTAL DOS POVOAMENTOS DE <i>Pinus spp.</i> , USADOS NO CONSUMO PRÓPRIO E NA VENDA, PARA CADA FUNÇÃO OBJETIVO.....	74
FIGURA 17 – VOLUME DE SORTIMENTOS DOS POVOAMENTOS DE <i>Pinus spp.</i> , PARA CADA FUNÇÃO OBJETIVO, UTILIZADOS NO CONSUMO PRÓPRIO.....	76
FIGURA 18 – VOLUME DE SORTIMENTOS DOS POVOAMENTOS DE <i>Pinus spp.</i> , PARA CADA FUNÇÃO OBJETIVO, UTILIZADOS PARA VENDA.....	78

FIGURA 19 – DINÂMICA DO FLUXO DE CAIXA DOS POVOAMENTOS DE *Pinus* spp.,
PARA CADA FUNÇÃO OBJETIVO..... 79

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 –	MODELOS TESTADOS PARA CLASSIFICAR OS SÍTIOS FLORESTAIS DE <i>Pinus elliottii</i> e <i>taeda</i> , NA REGIÃO DE CAÇADOR, SC	30
TABELA 2 –	CLASSES DE SORTIMENTOS E PREÇOS DE MERCADO	37
TABELA 3 –	CUSTO MÉDIO DAS ATIVIDADES SILVICULTURAIS	39
TABELA 4 –	COEFICIENTES ESTIMADOS E ESTATÍSTICAS DE PRECISÃO DOS MODELOS TESTADOS PARA A CLASSIFICAÇÃO DE SÍTIO DE <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i> , NA REGIÃO DE CAÇADOR, SC	45
TABELA 5 –	LIMITE INFERIOR (LI) E LIMITE SUPERIOR (LS) DAS CLASSES DE SÍTIO DE <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i> , NA REGIÃO DE CAÇADOR, SC	50
TABELA 6 –	ESTATÍSTICA DESCRITIVA DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS DE DIÂMETRO, ALTURA TOTAL E VOLUME INDIVIDUAL DE <i>Pinus</i> spp., NA REGIÃO DE CAÇADOR, SC	54
TABELA 7 –	COEFICIENTES ESTIMADOS E ESTATÍSTICAS DE AJUSTE E PRECISÃO DA FUNÇÃO DE AFILAMENTO AJUSTADA PARA ESTIMAR OS DIÂMETROS DE <i>Pinus</i> spp., NA REGIÃO DE CAÇADOR, SC	55
TABELA 8 –	ESTATÍSTICAS DE PRECISÃO DA FUNÇÃO DE AFILAMENTO AJUSTADA PARA ESTIMAR O VOLUME TOTAL COM CASCA DE <i>Pinus</i> spp., NA REGIÃO DE CAÇADOR, SC	59
TABELA 9 –	COMPARAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DE DIÂMETRO E VOLUME TOTAL COM CASCA OBTIDAS DO MÉTODO COM E SEM AGRUPAMENTO DOS DADOS	65
TABELA 10 –	NÚMERO DE ITERAÇÕES E TEMPO PARA PROCESSAMENTO DO MODELO DE REGULAÇÃO DOS POVOAMENTOS DE <i>Pinus</i> spp., PARA CADA FUNÇÃO OBJETIVO	68
TABELA 11 –	ÁREA MÉDIA ANUAL E TOTAL DAS ATIVIDADES SILVICULTURAIS REALIZADAS NOS POVOAMENTOS DE <i>Pinus</i> spp., PARA CADA FUNÇÃO OBJETIVO	70
TABELA 12 –	VOLUME MÉDIO ANUAL E TOTAL E RECEITA MÉDIA ANUAL E TOTAL DOS POVOAMENTOS DE <i>Pinus</i> spp., PARA CADA FUNÇÃO OBJETIVO	80
TABELA 13 –	TALHÕES SELECIONADOS PARA ATIVIDADES SILVICULTURAIS NO PRIMEIRO ANO NO HORIZONTE DE PLANEJAMENTO, PARA FUNÇÃO OBJETIVO QUE MAXIMIZOU O VALOR PRESENTE LIQUIDO DOS POVOAMENTOS DE <i>Pinus</i> spp.	82

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. OBJETIVO GERAL.....	14
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2. REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1. O PINUS NA SILVICULTURA BRASILEIRA.....	15
2.2. PLANEJAMENTO FLORESTAL	18
2.3. REGULAÇÃO DE FLORESTAS	20
2.4. MODELOS DE REGULAÇÃO FLORESTAL.....	22
2.5. PESQUISA OPERACIONAL	23
2.6. PROGRAMAÇÃO LINEAR APLICADA AO MANEJO DE FLORESTAS	25
3. MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	27
3.1.1. Origem dos dados	28
3.2. CLASSIFICAÇÃO DE SÍTIOS FLORESTAIS	29
3.2.1. Ajuste dos modelos para classificação de sítios	29
3.2.2. Teste de anamorfismo.....	32
3.3. MODELO DE AFILAMENTO	33
3.3.1. Comparação dos métodos de estimativa de diâmetro e volume	35
3.4. CLASSES DE SORTIMENTO DE PRODUTOS	37
3.5. ANÁLISE ECONÔMICA DOS REGIMES DE MANEJO	37
3.5.1. Custos de implantação	38
3.6. REGIMES DE MANEJO SIMULADOS	39
3.7. MODELO MATEMÁTICO DE REGULAÇÃO	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1. CLASSIFICAÇÃO DE SÍTIO.....	44
4.1.1. Confiabilidade das curvas de sítio	50
4.2. AJUSTE DO MODELO DE AFILAMENTO	53
4.2.1. Estimativas de diâmetro e volume	55
4.2.2. Identidade dos métodos de estimativas.....	65
4.3. ESTRUTURA DA FLORESTA PRÉ-REGULAÇÃO	66
4.4. PLANEJAMENTO OTIMIZADO DA FLORESTA	68
5. CONCLUSÕES	83
REFERÊNCIAS	85

1. INTRODUÇÃO

A madeira sempre foi considerada um recurso natural fundamental para o desenvolvimento da civilização, sendo utilizada para as mais diversas finalidades, como na construção civil, no transporte, na produção de energia, entre outras. Porém, a exploração desse recurso no passado foi realizada, geralmente, sem o mínimo de controle sobre as atividades de corte raso, visto que antigamente não havia preocupação quanto uma possível falta de produtos florestais, em decorrência das extensas áreas de florestas nativas existentes.

No entanto, a evolução da sociedade ao longo do tempo obrigou os manejadores a conduzirem as florestas nativas e os povoamentos florestais de maneira equilibrada, reduzindo os impactos negativos sobre o ambiente. Dessa forma, as práticas convencionais de exploração foram deixadas no passado, devido à crescente demanda por produtos de origem florestal e a consequente preocupação com uma possível falta desses recursos no futuro, ocasionada pela exaustão no uso das florestas, especialmente na Europa. Nesse contexto, o manejo de forma sustentável ganhou importância e passou a ser cada vez mais aprimorado e utilizado no planejamento da produção florestal.

Os empreendimentos florestais, de modo geral, possuem a característica marcante de exigirem um planejamento muito detalhado e eficiente de todas as operações florestais, em decorrência do tempo necessário para à implantação, maturação e a colheita final da floresta. Esse fato faz com que ferramentas matemáticas, estatísticas e computacionais se tornem essenciais no dia-a-dia do planejador, para auxiliar na identificação de problemas relacionados as atividades recorrentes e do processo de conversão da madeira nos produtos finais.

O planejamento florestal a longo prazo, também denominado de planejamento estratégico, somente foi impulsionado após o desenvolvimento de procedimentos matemáticos avançados e relacionados à pesquisa operacional (PO). A programação linear (PL), por meio do algoritmo *simplex*, foi desenvolvida por George Bernard Dantzig, na década de 1940, e proporcionou uma verdadeira revolução no setor industrial, em virtude da sua capacidade de resolver problemas corriqueiros e altamente complexos.

A partir do surgimento da programação linear e do seu sucesso na solução dos problemas de planejamento, os manejadores florestais foram capazes de simular inúmeras combinações de atividades silviculturais e selecionar aquela mais adequada para determinado povoamento, como a escolha da densidade inicial, o peso dos desbastes em cada intervenção, a idade de colheita ideal, entre outras. Dessa forma, a tomada de decisão referente à produção madeireira e não madeireira passou a ser fundamentada em informações mais sofisticadas e consistentes, as quais eram resultados de análises técnico-científicas e não apenas do conhecimento empírico adquirido pelo manejador ao longo do tempo.

Atualmente, há grande preocupação quanto a estabilidade da produção florestal em função do elevado grau de desbalanceamento da estrutura volumétrica que muitas florestas apresentam, devido, principalmente, à rápida expansão dos empreendimentos florestais nos últimos anos. Porém, solucionar problemas que envolvem a regulação das florestas ainda não é uma tarefa simples e fácil para o manejador, mesmo com o auxílio da programação linear e os outros métodos matemáticos mais modernos, pois uma grande quantidade de variáveis de decisão e restrições devem ser levadas em consideração no planejamento estratégico, o que exige bastante tempo no processamento dos dados e análise dos resultados.

Na literatura florestal são encontrados modelos de regulação baseados na maximização do volume total dos povoamentos ou dos retornos financeiros, mas, pouco conhecimento se tem referente a regulação das florestas por meio do sortimento e o seu comportamento ao longo do horizonte de planejamento. Devido a essa lacuna no conhecimento, é fundamental que seja melhor estudada, pois possibilita uma forma de otimização potencialmente mais eficiente, visto que um empreendimento pode apresentar demanda por produtos de madeira específicos, os quais no planejamento comumente realizado podem não ser obtidos.

Portanto, definir diferentes estratégias de regulação é um processo essencial no planejamento, para permitir que alternativas de manejo estejam disponíveis na tomada de decisão e evitar que os empreendimentos fiquem suscetíveis às oscilações do mercado, especialmente quando o horizonte de planejamento envolvido é de longo prazo.

1.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do presente estudo foi planejar a produção volumétrica e realizar o agendamento da colheita dos povoamentos de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, localizados na região de Caçador, no estado de Santa Catarina, Brasil.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos foram definidos como:

- Classificar as áreas florestais quanto a sua produtividade, por meio de modelos estatísticos não lineares e construir curvas anamórficas de índice de sítio, para os povoamentos de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*;
- Ajustar o modelo de afilamento polinomial de 5º Grau e analisar estatisticamente o seu desempenho para estimar o volume total das árvores de *Pinus* spp. para cada idade e para o conjunto total dos dados;
- Analisar a estrutura dos povoamentos florestais pré-regulação e testar diferentes estratégias de otimização para regular o volume de sortimentos dos povoamentos de *Pinus* spp.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. O PINUS NA SILVICULTURA BRASILEIRA

As espécies pertencentes ao gênero *Pinus* têm sido plantadas no Brasil há mais de um século, sendo muitas delas trazidas por imigrantes europeus para fins ornamentais e também para produção de madeira. As primeiras introduções que se têm conhecimento foram estabelecidas no Rio Grande do Sul, em torno de 1880, com o plantio de *Pinus canariensis* C. Smith in Buch, proveniente das Ilhas Canárias. Em 1948, o Serviço Florestal do Estado de São Paulo introduziu diversas espécies americanas, conhecidas como “pinheiros amarelos”, que incluem *Pinus palustris* Mill., *Pinus echinata* Mill., *Pinus elliottii* Engelm. e *Pinus taeda* L. Dentre essas espécies, as duas últimas se destacaram pela facilidade nos tratamentos silviculturais, rápido crescimento e reprodução intensa no Sul e Sudeste do país (SHIMIZU, 2008), caracterizando-se como as duas principais espécies do gênero plantadas nessas regiões, principalmente em virtude da excelente adaptabilidade às condições edafoclimáticas (VASQUES *et al.*, 2007).

No Brasil, a área plantada com espécies de origem florestal atingiu 7,6 milhões de hectares no ano de 2013. Somente as espécies do gênero *Pinus* representaram 20,7% dessa área total, o que equivale a 1.570.146 ha, sendo 0,5% superior em relação ao indicador do ano de 2012 (IBÁ, 2014). As maiores concentrações dos plantios de *Pinus* estão localizadas na Região Sul do país, devido, principalmente, às condições edafoclimáticas e à localização dos principais centros processadores desse tipo de madeira (ABRAF, 2013). Apenas os estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul possuem 1.367.012 ha (87,06%) da área plantada desse gênero (IBÁ, 2014).

Porém, as áreas de plantações florestais aumentaram de forma expressiva e com a finalidade de produção madeireira, a nível industrial, somente a partir da lei dos incentivos fiscais, realizadas entre as décadas de 1970 e 1980. Esse aumento em área plantada se deu em decorrência da necessidade de reduzir a pressão sobre as florestas nativas e, de acordo com Selle *et al.* (1994), para substituir a madeira de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, cujos povoamentos encontravam-se em rápido

processo de exaustão. Segundo Shimizu (2008), o outro motivo foi a mudança no desenvolvimento econômico brasileiro, em que foi dada preferência para substituição das importações, sobretudo de papel, pela produção de bens domésticos, com a finalidade de dinamizar a economia nacional.

Ainda, a importante característica de adaptação aos solos ligeiramente ácidos, que ocorrem em grande parte dos solos do país, juntamente com práticas silviculturais adequadas, possibilitou a implantação de extensas áreas de plantios de *Pinus* spp., tornando esse gênero uma importante fonte de matéria-prima industrial, proveniente de florestas conduzidas dentro de satisfatórios padrões de sustentabilidade (KRONKA *et al.*, 2005).

A partir da expansão das áreas de reflorestamento, iniciou-se um processo de melhoramento genético, visando tornar mais produtiva as áreas florestais e para melhor atender à crescente demanda por produtos de origem florestal. O programa de melhoramento de *Pinus* se concentrou nas espécies de maior interesse econômico e para produção de celulose e papel, nas quais destacavam-se as espécies *Pinus taeda*, *Pinus elliottii* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Sénécl.) W.H.G. Barrett & Golfari. O melhoramento genético proporcionou significativos ganhos de produtividade nessas espécies, contribuindo, também, para a melhoria da qualidade da matéria-prima (AGUIAR *et al.*, 2011). Atualmente, o incremento médio anual da produção volumétrica nos povoamentos de *Pinus* das empresas associadas da ABRAF (2013) está na ordem de $40,1 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, sendo um resultado direto do melhoramento florestal e das práticas de manejo adequadas a cada região.

Os primeiros reflorestamentos do Brasil foram implantados com a finalidade de suprir a indústria de papel e celulose. Assim, os povoamentos eram estabelecidos com densidade inicial de 2.000 a 2.500 árvores por hectare (espaçamentos de 2,5 x 2,0 e 2,0 x 2,0, respectivamente) e a idade de rotação próxima de 20 anos, os quais resultavam em elevada produção de biomassa por unidade de área. Nessa época, o manejo florestal não previa a adoção de desramas e desbastes, pois havia o interesse apenas na produção de grande quantidade de madeira. Posteriormente, percebeu-se que havia um rápido crescimento das espécies no Brasil, o que tornava necessário cortes intermediários, visto que a perda em incremento volumétrico seria muito grande. Dessa forma, a condução da floresta com um, dois e até três cortes intermediários passaram a ser adotados nos planos de manejo (SANQUETTA, 2002).

Atualmente, os regimes de manejo que são praticados em diversas empresas do setor florestal, especialmente no Sul e Sudeste do país, também preveem a aplicação de desramas e desbastes ao longo da rotação, quando o objetivo é produzir multiprodutos (sortimentos) de madeira e para diferentes segmentos industriais. Contudo, percebe-se que existe uma tendência de estabelecimento de plantios com espaçamentos mais amplos, sobretudo para reduzir os elevados custos envolvidos no primeiro e no segundo desbaste e, dessa forma, concentrar a desrama em um menor número de árvores e de melhor qualidade, que possivelmente serão colhidas no corte raso. Por outro lado, os planos de manejo sem desbastes são, em geral, aplicados em povoamentos destinados à produção de celulose e papel de maior resistência mecânica.

O segmento industrial de produtos serrados e sólidos é responsável pelo maior consumo da madeira (*in natura*) de espécies do gênero *Pinus*, no país, seguido dos painéis de madeira, celulose e papel e lenha industrial. Nos últimos anos, foi observado uma tendência de crescimento no consumo interno de produtos serrados, enquanto houve uma estabilização nas exportações, como pode ser observado na FIGURA 1, sendo que os maiores importadores deste tipo de produto são Estados Unidos, Arábia Saudita, China, Vietnã e Tailândia (IBÁ, 2014).

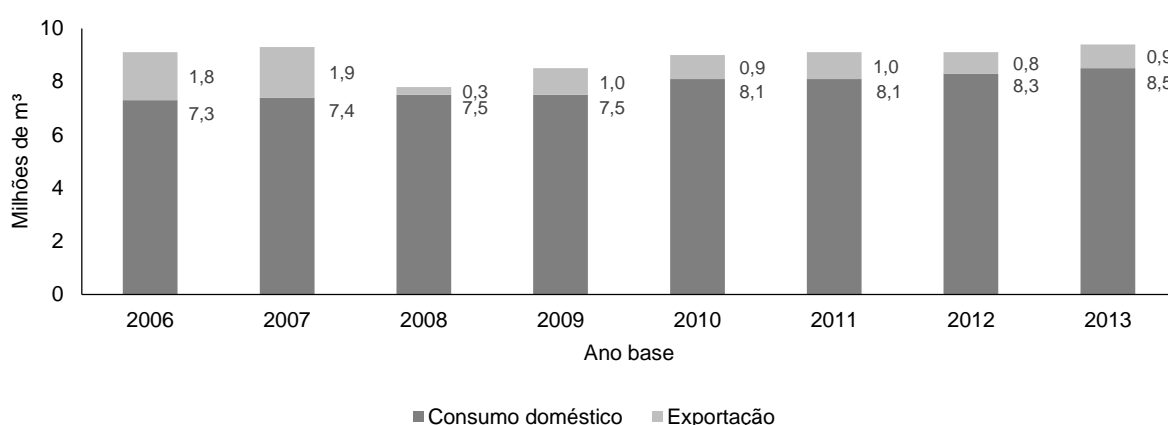


FIGURA 1 – CONSUMO DOMÉSTICO E EXPORTAÇÃO DE MADEIRA SERRADA (ADAPTADO DE IBÁ, 2014)

2.2. PLANEJAMENTO FLORESTAL

Para que um empreendimento florestal se torne sustentável em termos econômico, ambiental e social, primeiramente é necessário um planejamento preciso de todas as atividades a serem realizadas, sejam essas diretamente relacionadas ou não com o processo produtivo. Na literatura, o conceito de planejamento é bastante amplo. Porém, todas as definições implicam no ato ou efeito de antecipar ou prever algo que ainda não aconteceu. Nesse sentido, Schneider (2008) refere-se ao planejamento como o conjunto de medidas a serem tomadas para alcançar os objetivos do empreendimento, com base no conhecimento da situação atual e das possibilidades futuras da empresa.

Quando se trata de planejamento florestal, Hosokawa (1982) ressaltou que esse conceito está relacionado ao ordenamento da floresta, tanto em aperfeiçoamento da produção madeireira e da produção financeira quanto da produção de benefícios indiretos (sociais e ecológicos) a um custo mínimo, sejam esses custos de produção, sociais ou ecológicos, o que tornam necessárias informações de ordem biológica, ecológica, biométrica, econométrica, ergométrica e sociológica.

Para Arce (1997), várias dificuldades tornam as decisões relacionadas ao planejamento florestal particularmente complexas, dentre as quais se destacam: 1) o longo prazo que caracteriza o planejamento do processo produtivo florestal e introduz um grau significativo de incerteza sobre as futuras condições econômicas e biológicas; e 2) o número essencialmente ilimitado de regimes de manejo possíveis, os quais acabam dificultando a tomada de decisão.

No planejamento da produção de uma empresa florestal, devem ser avaliados vários aspectos que exercem influência direta ou indireta no custo final de produção, independente da sua finalidade industrial. Assim, essas informações podem auxiliar na tomada de decisão e também na busca pela otimização da atividade florestal (STALL, 2012). Quando executado de forma eficiente, o planejamento da produção florestal possui potencial de reduzir as incertezas envolvidas no processo de tomada de decisão e, conseqüentemente, provocar um aumento da probabilidade de alcance dos objetivos, desafios e metas estabelecidos para o empreendimento (REBOUÇAS, 2002). Desse modo, a empresa é capaz de produzir a matéria-prima em quantidade e

qualidade suficiente para atender a demanda em questão, além de estar menos susceptível aos efeitos das oscilações do mercado florestal.

Devido à complexidade envolvida, o planejamento da produção florestal pode ser classificado em subproblemas, os quais obedecem uma estrutura hierárquica composta por objetivos pré-definidos em cada nível empresarial, na qual existe uma escala de tempo para o cumprimento das atividades florestais (GOMIDE, 2009). De acordo com Mitchell (2004), as operações florestais são tradicionalmente classificadas na seguinte ordem hierárquica (FIGURA 2): Planejamento Estratégico, Planejamento Tático e Planejamento Operacional.

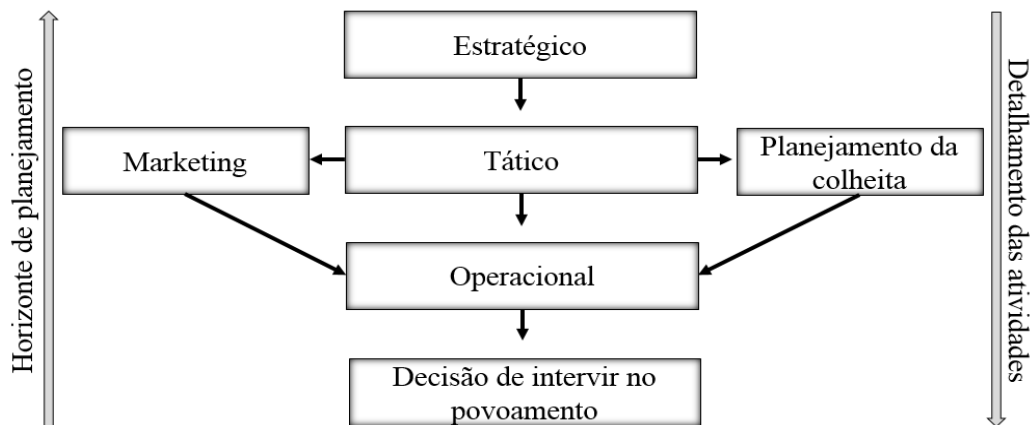


FIGURA 2 – ESTRUTURA HIERÁRQUICA DO PLANEJAMENTO FLORESTAL (ADAPTADO DE MITCHELL, 2004)

O Planejamento Estratégico considera a sustentabilidade florestal a longo prazo e está na escala mais distante do ano zero, em termos de tempo, quando comparado com os demais estágios. O horizonte de planejamento é feito para duas a quatro rotações, dependendo da espécie a ser plantada. É também levado em consideração os futuros investimentos do empreendimento florestal, além da seleção dos regimes de manejo a serem aplicados nos povoamentos. Existe alto grau de incertezas e riscos sobre as atividades pois esse tipo de planejamento é dependente de informações internas e externas à empresa.

O Planejamento Tático está relacionado com a tomada de decisão a médio prazo. Geralmente envolve de dois a cinco anos do horizonte de planejamento, no qual o nível de incertezas e riscos é moderado, mas ainda é dependente de informações internas e externas à empresa. Nesse estágio é planejado quais talhões devem ser colhidos nos próximos meses, as restrições ambientais na colheita, os

custos envolvidos na construção de estradas e no transporte da madeira, além da análise de mercado.

E por fim, o Planejamento Operacional envolve as operações semanais ou diárias das atividades provenientes do planejamento Estratégico e Tático, como a definição das unidades de colheita e na alocação dos produtos florestais. Nesse estágio, as atividades são planejadas de forma mais detalhada, com baixo grau de incertezas e riscos.

2.3. REGULAÇÃO DE FLORESTAS

Em termos gerais, o manejo florestal pode ser definido como um conjunto de técnicas e ações que são empregadas em uma floresta, com a finalidade de conduzir a produção madeireira e não madeireira de forma equilibrada ao longo do tempo, visando o abastecimento contínuo de produtos e serviços no empreendimento. No entanto, para gerir de forma sustentável os recursos provenientes das áreas florestais e alcançar os objetivos impostos pelas empresas, muitas vezes as florestas precisam ser manejadas distintamente. Nesse sentido, Clutter *et al.* (1983) classificaram o manejo florestal nas categorias de Manejo Florestal em Nível de Povoamento e Manejo Florestal em Nível de Floresta, sendo essa divisão realizada com base no tipo e no nível de planejamento envolvido.

O Manejo em Nível de Povoamento (*Stand-Level Management*) é frequentemente aplicado no manejo de pequenas áreas e permite que os retornos econômicos dos plantios sejam maximizados, pois cada povoamento é tratado individualmente. Contudo, para áreas de grandes dimensões, existe a preocupação de que a colheita de madeira seja relativamente estável ao longo dos anos. Assim, a floresta é tratada como uma entidade única e o Manejo em Nível de Floresta (*Forest-Level Management*), também conhecido como regulação florestal, torna-se mais apropriado, mas exige o uso de procedimentos complexos de análise e planejamento (CLUTTER *et al.*, 1983).

Segundo Piassi (2011), o processo de regulação florestal consiste em determinar a quantidade de madeira ou qualquer outro produto florestal a ser colhida, respeitando os objetivos da empresa ou organização florestal. É uma das atividades

mais difíceis no planejamento florestal por ser extremamente complexa, devido ao grande número de variáveis relacionadas ou envolvidas no processo.

Davis e Johnson (1987) definiram uma floresta regulada como aquela em que são observadas áreas proporcionais em todas as classes de idade, dá implantação à idade de rotação, crescendo constantemente, e sendo capazes de fornecer matéria-prima em quantidade e qualidade suficientes para atender o mercado de forma contínua. Semelhante a esse conceito, Leuschner (1984) definiu floresta regulada aquela em que as áreas e os volumes explorados permanecem os mesmos periodicamente, o que possibilita o suprimento da demanda de produtos no mercado em um período definido de tempo.

Apesar do conceito de floresta regulada ser de fácil entendimento, maiores dificuldades são encontradas no momento de se planejar estrategicamente o uso dos povoamentos florestais, visto que eles apresentam capacidades produtivas distintas em função da qualidade de sítio. A FIGURA 3 apresenta a estrutura de uma hipotética floresta regulada, para uma idade de rotação de 10 anos. Para que uma floresta seja de fato regulada, é necessário que a sua estrutura possibilite que as produções volumétricas obtidas ao longo da rotação florestal estejam dentro de limites de demandas mínimos e máximos definidos pela empresa, mesmo que existam variações na qualidade de sítio.

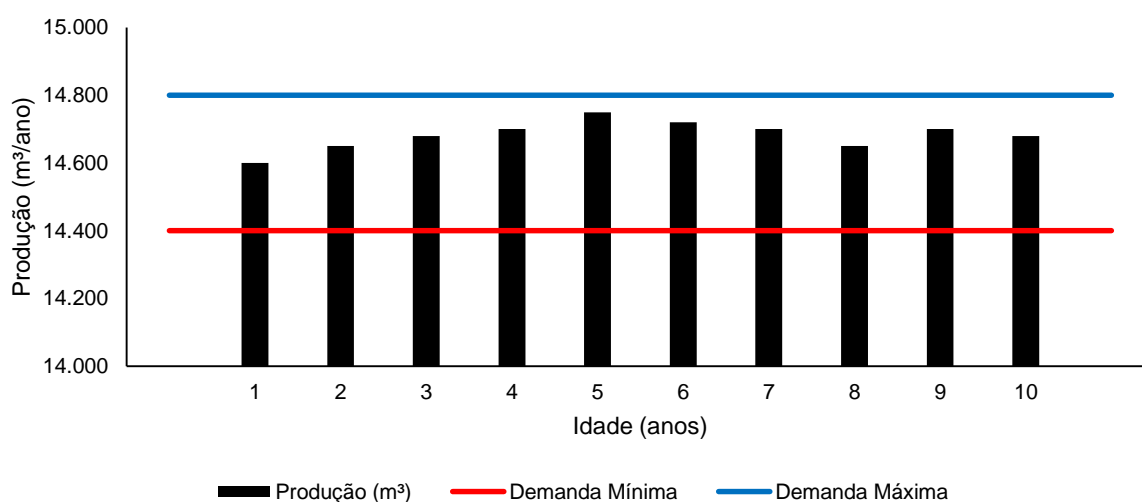


FIGURA 3 – ESTRUTURA DE UMA HIPOTÉTICA FLORESTA REGULADA

Neste sentido, o conceito mais apropriado é apresentado por Meyer *et al.* (1961), os quais consideraram floresta regulada, aquela manejada sob um plano de manejo específico que limita a exploração da floresta à capacidade produtiva do sítio, utilizando uma determinada técnica de manejo florestal para garantir, sem interrupção ou redução substancial, matéria-prima para a indústria, ou bens e serviços para a sociedade.

Davis (1966) destacou os principais benefícios obtidos com a floresta regulada, os quais podem ser resumidos da seguinte forma:

- Produções anuais equilibradas quanto ao volume, tamanho, qualidade e valor da madeira, proporcionando uma base estável para o plano de negócios;
- O volume de madeira colhido anualmente e os rendimentos são obtidos do estoque de crescimento, não sendo maiores que os necessários;
- Receitas e custos anuais aproximadamente constantes;
- A estrutura balanceada das classes de idade possibilita maior controle sobre as pragas, doenças, ventos, queimadas, dentre outros, possibilitando uma maior proteção florestal;
- Melhor aproveitamento dos demais usos da floresta, como recreação, proteção das nascentes de água, proteção ambiental e benefícios sociais.
- Uso regular e contínuo da mão-de-obra disponível.

2.4. MODELOS DE REGULAÇÃO FLORESTAL

O processo de regulação dos povoamentos florestais é, tradicionalmente, classificado em duas abordagens básicas, as quais foram propostas por Johnson e Scheurman (1977), denominadas de modelo Tipo I e modelo Tipo II.

Os dois tipos de modelos de regulação são bastante flexíveis e permitem incluir novas variáveis em suas formulações (PIASSI, 2011). Atualmente, vários modelos de regulação levam em considerações aspectos do ambiente em que os povoamentos florestais estão localizados e, segundo Gomide (2009), isso permite a identificação de alguns componentes da paisagem que podem servir de auxílio na tomada de decisão mais consciente sobre os aspectos ecológicos do ecossistema.

O Modelo Tipo I possibilita uma subdivisão da floresta em unidades de manejo homogêneas (talhões), conforme critérios previamente estabelecidos pelo modelador. Posteriormente, é prescrito um conjunto pré-determinado de alternativas de manejo para cada uma dessas unidades, as quais representam sequências de ações que irão ocorrer ao longo do horizonte de planejamento, como, por exemplo, a idade de colheita de uma área, seguida de regeneração ou replantio. Assim, após a definição de determinada prescrição, a unidade de manejo seguirá sobre tal regime durante todo o horizonte de planejamento, o que permite manter a sua identidade física (RODRIGUES, 2001). Por outro lado, o Modelo Tipo II possibilita que áreas cortadas e regeneradas em um determinado período sejam mescladas e re combinadas em novas unidades de manejo, as quais são agrupadas pela sua idade, mas não sendo necessariamente adjacentes (ARCE, 2007). A flexibilidade desse modelo é o que leva a perda da identidade física das unidades de manejo.

Assim sendo, as variáveis de decisão para cada modelo podem ser escritas da seguinte forma:

- Modelo Tipo I $\rightarrow X_{ij}$ é a área em hectares do talhão i a ser manejada com a prescrição j ;
- Modelo Tipo II $\rightarrow X_{ij}$ é a área em hectares da classe de idade j a ser manejada com a prescrição i .

A principal vantagem de se formular problemas florestais seguindo a metodologia do Modelo Tipo II está na redução no número de variáveis e restrições, o que, conseqüentemente, diminui o esforço computacional durante o processamento dos dados, quando comparado com o Modelo Tipo I. No entanto, Rodrigues *et al.* (2006) ressaltaram que as características do Modelo Tipo II, no momento da formulação das alternativas de manejo, podem implicar em modificações drásticas quando usado a programação inteira (PI), resultando, por exemplo, em modelos de PI de natureza não-linear e requerendo métodos de solução menos eficientes.

2.5. PESQUISA OPERACIONAL

A pesquisa operacional (PO) é uma área de conhecimento interdisciplinar voltada para o desenvolvimento de modelos matemáticos e algoritmos para a solução de problemas reais e complexos (LOPES *et al.*, 2013), visando otimizar métodos,

processos e/ou atividades que são objetos de estudo do modelador e que estão sujeitas a determinado conjunto de restrições.

A origem da pesquisa operacional é atribuída às atividades militares, especialmente na Segunda Guerra Mundial, em consequência da necessidade de se alocar de forma eficiente os escassos recursos materiais para diversas operações militares e atividades internas a cada operação (HILLIER; LIEBERMAN, 2006). A pesquisa operacional foi impulsionada na década de 1950, a partir do surgimento dos computadores de alta velocidade. Após o seu sucesso na área militar, logo foi utilizada no setor industrial, governamental e, posteriormente, na agropecuária. Atualmente, está sendo utilizada nas mais diversas áreas do conhecimento (CARNIERI, 1989).

O desenvolvimento computacional dos últimos anos proporcionou significativos avanços na área da pesquisa operacional, principalmente em virtude da rápida execução de procedimentos matemáticos, permitindo que fossem criadas e aplicadas diversas ferramentas de auxílio no planejamento e/ou otimização de atividades, como os algoritmos.

Em se tratando do planejamento de operações florestais, a programação linear é utilizada com mais frequência, uma vez que os problemas relacionados a florestas geralmente envolvem funções objetivo e restrições lineares, como podem ser observados nos trabalhos de Carvalho (2012), Piassi (2011), Santos (2012), Silva *et al.* (2003a) e Silva *et al.* (2003b). Outras técnicas matemáticas também aplicadas por alguns pesquisados na área florestal e que apresentam bom desempenho são: programação inteira, programação inteira mista, programação dinâmica, programação não linear e otimização em redes (ARCE, 1997; CAMPOS *et al.*, 2013; CARNIERI, 1989; GOMIDE *et al.*, 2013; SILVA *et al.*, 2007; RODRIGUES *et al.*, 2006).

Em problemas extremamente complexos ou que envolvem uma grande quantidade de variáveis na modelagem, é impossível a resolução por métodos e algoritmos de otimização disponíveis e frequentemente aplicados. Nesses casos, Taha (2008) recomendou abandonar a busca por uma solução ótima e simplesmente procurar uma solução boa, aplicando técnicas heurísticas de otimização. Entre as diversas técnicas heurísticas aplicadas na área florestal, o *Simulated Annealing* (SA), o Algoritmo Genético (AG), o Enxame de Partículas (EP) e a Busca Tabu (BT) se destacam e são frequentemente aplicados. Falcão e Borges (2003), Gomide *et al.* (2013), Gomide *et al.* (2014), Ghaemi e Feizi-Derakhshi (2014), Liu *et al.* (2005), Nascimento *et al.* (2012), Pukkala e Heinonen (2006) e Silva *et al.* (2009) encontraram

resultados bastante satisfatórios usando métodos heurísticos para o manejo de povoamentos e a otimização de problemas florestais.

O sucesso de um modelo matemático de pesquisa operacional para resolver um problema florestal depende também de seu nível de adequação à situação real, pois é praticamente impossível a construção de um modelo que contemple todas as possibilidades de escolha, principalmente devido ao grande número de fatores que podem influenciar a tomada de decisão, como a escolha adequada das espécies para plantio, as formas de corte e transporte da madeira, além de problemas de desbastes, rebrotas, tratamentos silviculturais, entre outras (CARNIERI, 1989). De acordo com Taha (2008), o tipo e a complexidade dos modelos matemáticos a serem resolvidos é o que determina a natureza dos métodos de solução, pois, não existe uma técnica capaz de resolver todos os problemas que podem surgir na prática.

2.6. PROGRAMAÇÃO LINEAR APLICADA AO MANEJO DE FLORESTAS

A programação linear faz uso de modelos matemáticos para encontrar soluções em problemas de otimização. O adjetivo linear significa que todas as funções matemáticas deste modelo são lineares, enquanto a palavra programação, neste caso, não se refere a programação de computador, mas é um sinônimo de planejamento (HILLIER; LIEBERMAN, 2006).

Buongiorno e Gilless (2003) conceituaram a programação linear como um método matemático de alocar recursos limitados em atividades concorrentes de maneira ótima, ou seja, de proporcionar o melhor retorno entre todas as alternativas viáveis.

O modelo de programação linear é sempre formulado com a finalidade de maximizar ou minimizar uma função objetivo, mas sempre atendendo a um conjunto de limitações, as quais são chamadas de restrições (inequações ou equações). No modelo, a variável Z representa o valor da função objetivo; c é um vetor de coeficientes que indicam a contribuição das variáveis de decisão X ; A é uma matriz de coeficientes das restrições; e r é um vetor das restrições (LEUSCHNER, 1990), que representam a quantidade disponível de cada recurso. Um modelo genérico é representado a seguir.

$$\text{Max ou Min } Z = c_1X_1 + c_2X_2 + \dots + c_nX_n$$

$$AX \geq r$$

$$X \geq 0$$

O primeiro método de solução criado para resolver problemas com o uso da programação linear é chamado de *simplex*, o qual foi desenvolvido inicialmente por George Dantzig, em 1947. No início, somente problemas pequenos podiam ser solucionados por esse algoritmo e de forma manual, ou então com o auxílio de uma calculadora simples (BUONGIORNO, GILLESS, 2003; HILLIER, LIEBERMAN, 2006). Porém, com o desenvolvimento de máquinas mais potentes e sofisticadas, como o computador, problemas envolvendo milhares de variáveis e restrições puderam ser resolvidos em questão de pouco tempo.

Na área florestal, Rodrigues (2001) destacou que os processos de gerenciamento passaram por grandes reformulações durante a década de 1980, sendo que uma delas foi adotar a programação linear em conjunto com outros modelos de otimização. A partir desses resultados iniciais bastante promissores, essa técnica foi cada vez mais estudada e aplicada.

Carvalho (2012) analisou a influência de variáveis econômicas na regulação de povoamentos florestais usando programação linear. As funções objetivo formuladas para maximizar a produção volumétrica e o valor presente líquido e minimizar o custo e o custo médio de produção se mostraram todas viáveis, pois foram capazes de regular a estrutura da floresta.

Por sua vez, Silva *et al.* (2003b) avaliaram a influência das estimativas de produção de madeira na regulação de florestas, também usando programação linear, mas com a finalidade de maximizar o valor presente líquido dos povoamentos florestais. Os autores chegaram à conclusão de que as estimativas de produção de diferentes naturezas influenciam diretamente na condução da floresta, alterando o processo de tomada de decisão para uma mesma função objetivo.

Enquanto Campos *et al.* (2013) aplicaram a programação linear inteira na conversão de árvores em multiprodutos de madeira, na qual a maximização da receita total demonstrou ser uma ótima alternativa de remuneração advinda do povoamento florestal.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Juliana Florestal Ltda. é uma empresa associada a Frame Madeiras Especiais Ltda., as quais em conjunto formam o grupo Frameport, com a sede localizada no município de Caçador, estado de Santa Catarina, Brasil.

A empresa Juliana Florestal possui, aproximadamente, 11.800 ha de unidades de manejo nativas e plantadas distribuídas no Alto Vale do Rio do Peixe, região meio Oeste de Santa Catarina, compreendendo os municípios de Caçador, Macieira, Calmon, Timbó Grande, Lebon Régis, Rio das Antas e Santa Cecília, como pode ser observado na FIGURA 4.

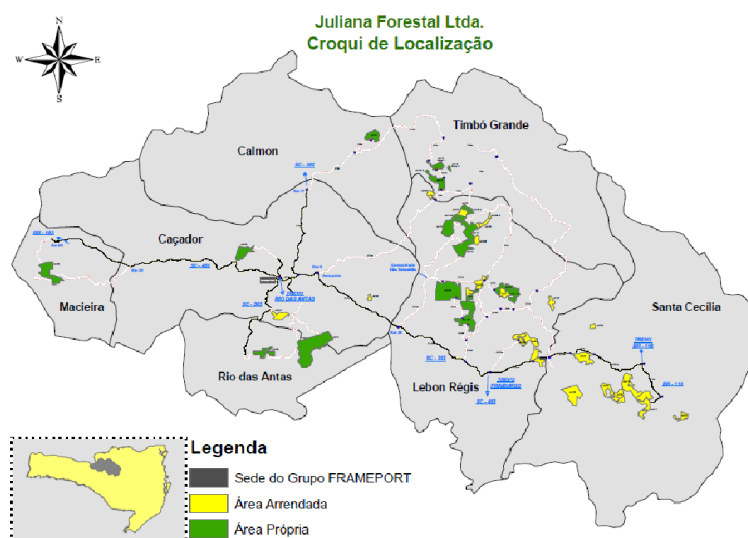


FIGURA 4 – LOCALIZAÇÃO DAS UNIDADES DE MANEJO NATIVAS E PLANTADAS DA EMPRESA JULIANA FLORESTAL

De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima predominante na região é o Cfb, ou seja, clima mesotérmico úmido, sem estação seca, com verões frescos e invernos rigorosos com geadas fortes. Segundo as informações meteorológicas da Estação Experimental de Caçador, a temperatura média anual é de 16,5°C, a precipitação média anual é de 1.608 mm, a umidade relativa do ar média

anual é de 77% e possui ocorrência de, em média, 26 geadas por ano (KURASZ, 2005).

Os principais tipos de solos encontrados na região do presente estudo são os Cambissolos háplicos, com grande variação de profundidade e drenagem variando de acentuada à imperfeita, e Nitossolos brunos, de textura argilosa ou muito argilosa, em geral, moderadamente ácidos a ácidos (IBGE, 2007).

A vegetação predominante na região do presente estudo é a Floresta Ombrófila Mista (FOM), sob a formação Floresta Ombrófila Mista Montana, a qual ocupava originalmente a maior parte dos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Nessa tipologia florestal, a espécie *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. está associada à *Ocotea porosa* (Ness e Mart.) Barroso, formando agrupamentos bem característicos (IBGE, 2012).

3.1.1. Origem dos dados

A base de dados utilizada na presente pesquisa foi proveniente do Inventário Florestal Contínuo (IFC) da empresa Juliana Florestal, realizado em áreas com plantios das espécies *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*. O inventário florestal foi iniciado próximo dos 4 anos de idade para *Pinus taeda* e dos 12 anos de idade para *Pinus elliottii*, e se estendeu até o momento do corte raso da floresta.

As unidades amostrais permanentes de área fixa foram distribuídas de forma aleatória nos povoamentos florestais, com dimensões variando de 400 a 700 m². Dentro de cada unidade amostral foram levantadas as seguintes informações dendrométricas: diâmetro à altura do peito (d), altura total (h) de 20% das árvores contidas na parcela e a altura dominante (h_{dom}), além de informações sobre a qualidade do fuste (bifurcação, tortuosidade, ataque por pragas).

O cálculo da variável altura dominante foi realizado seguindo o princípio de Assmann (1961), o qual considera a altura média das 100 árvores sadias de maior diâmetro à altura do peito (d) por hectare como as árvores dominantes.

Atualmente, os povoamentos florestais da empresa Juliana Florestal são implantados com a espécie *Pinus taeda* no espaçamento inicial de 2,5 m x 2,5 m, equivalendo a densidade de 1.600 árvores por hectare (árv.ha⁻¹). O regime de manejo adotado pela empresa é o “alto-fuste”, ou seja, os povoamentos florestais são

conduzidos com a finalidade de obter toras de grandes dimensões e multiprodutos madeireiros no final da rotação. A idade de rotação considerada é de 25 anos, sendo previsto a realização de três desbastes ao longo do ciclo:

- 1° Desbaste: o primeiro desbaste é da forma misto (sistemático + seletivo) e está planejado para ocorrer aos 10 anos de idade do povoamento. No desbaste sistemático é removida a sétima linha de plantio, enquanto no seletivo são removidos 42% das árvores remanescentes, totalizando 50% das árvores plantadas;
- 2° Desbaste: o segundo desbaste é apenas seletivo e está planejado para ocorrer aos 15 anos de idade do povoamento, sendo removido 40% das árvores;
- 3° Desbaste: o terceiro desbaste também é apenas seletivo e está planejado para ocorrer aos 20 anos de idade do povoamento, sendo removido 30% das árvores.

3.2. CLASSIFICAÇÃO DE SÍTIOS FLORESTAIS

3.2.1. Ajuste dos modelos para classificação de sítios

A classificação de sítios para os povoamentos de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* foi realizada de forma independente, na qual foram utilizados 2.073 e 6.981 pares de dados de idade (I) e altura dominante (h_{dom}), respectivamente, provenientes do IFC da empresa. Os sítios florestais das duas espécies consideradas no presente estudo foram classificados usando a altura dominante, pois, segundo Machado *et al.* (1997), essa variável é eficiente para estimar o potencial produtivo dos povoamentos, visto que é pouco afetada por tratamentos silviculturais, tal como os desbastes.

O método da curva-guia foi utilizado para a construção das curvas de sítio para ambas as espécies. Esse método consiste em utilizar um modelo matemático de regressão linear ou não linear para representar a relação existente entre as variáveis idade e altura dominante. A partir da equação da curva-guia ajustada, foi possível obter a equação de índice de sítio, de modo que, quando a idade (I) do povoamento

for igual a idade de referência (I_r), a altura dominante (h_{dom}) é igual ao índice de sítio (IS) ($h_{dom} = IS \leftrightarrow I = I_r$).

O crescimento dos organismos biológicos é frequentemente representado por modelos matemáticos. A regressão linear é uma ferramenta amplamente utilizada para representar fenômenos biológicos na sua fase inicial. No entanto, quando esses fenômenos são estudados durante um longo período de tempo, eles não são bem representados por uma função linear, pois o desenvolvimento dos organismos é caracterizado por uma fase de rápido crescimento, que vai diminuindo o seu ritmo com o passar do tempo, até chegar à fase adulta, quando o processo tende a se estabilizar. Dessa forma, explicações mais realistas do crescimento biológico podem ser obtidas a partir de funções não lineares (REGAZZI, 2003).

Portanto, visando obter estimativas mais precisas, quatro modelos matemáticos não lineares foram testados para estimar a altura dominante das árvores nas diferentes idades e classificar os sítios florestais, os quais estão apresentados na TABELA 1, juntamente com a respectiva expressão aplicada para gerar as curvas anamórficas de índice de sítio.

TABELA 1 – MODELOS TESTADOS PARA CLASSIFICAR OS SÍTIOS FLORESTAIS DE *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, NA REGIÃO DE CAÇADOR, SC

AUTOR	MODELO	MODELO DE ÍNDICE DE SÍTIO	EQ.
Bailey de 4 Parâmetros	$h_{dom} = \beta_0 \left(1 - e^{-\beta_1 I^{\beta_2}} \right)^{\beta_3}$	$h_{dom} = IS \left(\frac{1 - e^{-\beta_1 I^{\beta_2}}}{1 - e^{-\beta_1 I_r^{\beta_2}}} \right)^{\beta_3}$	(1)
Chapman e Richards	$h_{dom} = \beta_0 \left(1 - e^{-\beta_1 I} \right)^{\beta_2}$	$h_{dom} = IS \left(\frac{1 - e^{-\beta_1 I}}{1 - e^{-\beta_1 I_r}} \right)^{\beta_2}$	(2)
Clutter e Jones	$h_{dom} = \beta_0 \left(1 + \beta_1 I^{\beta_2} \right)^{\beta_3}$	$h_{dom} = IS \left(\frac{1 + \beta_1 I^{\beta_2}}{1 + \beta_1 I_r^{\beta_2}} \right)^{\beta_3}$	(3)
Mitscherlich	$h_{dom} = \beta_0 \left(1 - \beta_1 e^{-\beta_2 I} \right)$	$h_{dom} = IS \left(\frac{1 - \beta_1 e^{-\beta_2 I}}{1 - \beta_1 e^{-\beta_2 I_r}} \right)$	(4)

Em que: h_{dom} = altura dominante (m); I = idade (anos); I_r = idade de referência (anos); IS = índice de sítio; β_s = parâmetros dos modelos.

Os parâmetros estimados dos modelos de regressão não linear foram obtidos por meio do algoritmo *Rosenbrock Pattern Search*, no programa STATISTICA 7®.

Para avaliar o desempenho dos modelos não lineares ajustados para a classificação de sítio foram realizadas análises numéricas e gráficas. O coeficiente de correlação ao quadrado R_{yy}^2 (5) foi utilizado no lugar do coeficiente de determinação R^2 , pois Regazzi (2010) afirma que o R^2 somente deve ser aplicado em modelos de regressão linear que possuem o intercepto. O autor ainda destaca que os valores encontrados na literatura para essa estatística geralmente são extremamente elevados e próximos de $R^2 = 99\%$, mesmo havendo enormes discrepâncias entre os valores observados e aqueles preditos pelo modelo. É comum o engano de que o R^2 , “a proporção de variação explicada”, é uma estatística para ser usada na análise do desempenho de modelos de regressão não linear. Somente quando se tem um modelo linear com o termo constante é que o R^2 representa a variação explicada pelo modelo. Portanto, o $R^2 = R_{yy}^2$ pode ser usado como uma aproximação mais adequada para essa estatística.

Foram calculados também o erro padrão da estimativa em porcentagem $S_{yx}\%$ (6), o viés V (7) e o erro quadrático MSE (8). A análise gráfica da dispersão dos resíduos Resíduos% (9) foi realizada para avaliar se as estimativas apresentavam alguma tendenciosidade e se os erros eram homogêneos.

O critério de informação de Akaike AIC (10) foi utilizado como uma estatística auxiliar para selecionar o modelo mais adequado aos dados. Segundo Sousa (2012), o AIC possibilita selecionar o modelo que minimiza a divergência de Kullback-Leibler (K-L), dentro de um grupo de modelos avaliados, a qual está relacionada a informação perdida por se usar um modelo aproximado e não o paramétrico. Este critério de informação é baseado no máximo da função de verossimilhança, sendo dependente do número de observações e parâmetros do modelo. O modelo que resultar no menor valor do AIC será aquele mais indicado.

$$R_{y\hat{y}}^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n y_i \hat{y}_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^n \hat{y}_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)}{n} \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}{n} \right] \left[\sum_{i=1}^n \hat{y}_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n \hat{y}_i \right)^2}{n} \right]} \quad (5)$$

$$S_{y\hat{y}} \% = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-p}}}{\bar{y}_i} 100 \quad (6)$$

$$V = \sum_{i=1}^n \frac{y_i - \hat{y}_i}{n} \quad (7)$$

$$MSE = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{n} \quad (8)$$

$$\text{Resíduos \%} = \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right) 100 \quad (9)$$

$$AIC = n \ln(\hat{\sigma}^2) + 2(p+1) \quad (10)$$

Em que: y_i = variável observada; \hat{y}_i = variável estimada; \bar{y} = média das variáveis observadas; n = número de observações; p = número de parâmetros do modelo; \ln = logaritmo natural; σ^2 = estimador de máxima verossimilhança da variância do erro.

3.2.2. Teste de anamorfismo

Para averiguar se o modelo matemático de melhor desempenho apresenta curvas anamórficas, o teste de anamorfismo, recomendado por Scolforo (2006), foi aplicado aos dados. Esse teste consistiu, basicamente, em verificar a existência de relação linear entre os índices de sítio (IS) e as alturas dominantes (h_{dom}) médias nas diferentes idades. Para tanto, foi utilizado o modelo de regressão linear simples descrito na expressão (11).

$$IS = \beta_0 + \beta_1 h_{\text{dom}} \quad (11)$$

Ainda, segundo Scolforo (2006), a partir do teste de anamorfismo, espera-se que sejam encontrados os seguintes resultados: o coeficiente b_0 deve ser igual a zero e o coeficiente b_1 maior que 1 nas idades menores do que a idade de referência, sendo esse valor tanto maior quanto menores forem as idades dos povoamentos. Já o coeficiente b_1 deve ser próximo a 1 na idade de referência e menor que 1 nas idades acima dessa.

3.3. MODELO DE AFILAMENTO

O método de cubagem de Smalian foi utilizado para obter o volume com casca de cada seção, enquanto o volume da ponta foi obtido pela fórmula do cone, conforme Machado e Figueiredo Filho (2009). As posições de medição do diâmetro com casca ao longo do fuste foram definidas de maneira relativa, com base na altura total da árvore, mas sem considerar a altura de toco.

Devido as poucas informações de cubagem em determinadas idades, tanto para *Pinus elliottii* quanto para *Pinus taeda*, optou-se por desconsiderar as diferenças da forma do fuste das duas espécies e, assim, juntar em um único banco de dados informações de ambas para se fazer estimativas de diâmetro e volume ao longo das idades.

O modelo polinomial de 5º Grau, também conhecido como modelo de Schöepfer (1966), foi utilizado para estimar os diâmetros ao longo do fuste e o volume total com casca das árvores de *Pinus* spp., as quais foram realizadas em planilha eletrônica da *Microsoft Office Excel*®, usando o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ).

Esta função de afilamento é amplamente utilizada na área florestal devido ao desempenho satisfatório nas estimativas de diâmetro, volume total e/ou de sortimentos de madeira. Drescher *et al.* (1999) destacaram que esta função possui grande flexibilidade, facilidade de determinação dos seus coeficientes e de integração numérica, permitindo calcular de forma precisa o volume de qualquer parte do tronco. Os autores ainda afirmaram que a equação de afilamento apresenta vantagem em

estimar, de maneira satisfatória e com boa precisão, o volume total e os volumes parciais.

A forma matemática para obtenção dos diâmetros em diferentes alturas do modelo polinomial de 5º Grau está apresentada na expressão (12).

$$\frac{d_i}{d} = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h_i}{h} \right) + \beta_2 \left(\frac{h_i}{h} \right)^2 + \beta_3 \left(\frac{h_i}{h} \right)^3 + \beta_4 \left(\frac{h_i}{h} \right)^4 + \beta_5 \left(\frac{h_i}{h} \right)^5 \quad (12)$$

Em que: d_i = diâmetro (cm) i tomado em diferentes alturas (h_i) ao longo do fuste (m); d = diâmetro à altura do peito (cm); h_i = altura (m) i em que ocorre determinado diâmetro (cm); h = altura total da árvore (m); β_s = parâmetros do modelo.

O modelo utilizado para estimar o volume em qualquer porção ao longo do fuste da árvore e, conseqüentemente, o sortimento florestal, foi obtido a partir da integral do polinômio de 5º Grau, resultando na expressão (13).

$$v = \frac{\pi}{40.000} d^2 \left[\begin{aligned} & c_0^2 h_i + c_0 c_1 h_i^2 + \left(\frac{2}{3} c_0 c_2 + \frac{1}{3} c_1^2 \right) h_i^3 + \left(\frac{1}{2} c_0 c_3 + \frac{1}{2} c_1 c_2 \right) h_i^4 \\ & + \left(\frac{2}{5} c_0 c_4 + \frac{2}{5} c_1 c_3 + \frac{1}{5} c_2^2 \right) h_i^5 + \left(\frac{1}{3} c_0 c_5 + \frac{1}{3} c_1 c_4 + \frac{1}{3} c_2 c_3 \right) h_i^6 \\ & + \left(\frac{2}{7} c_1 c_5 + \frac{2}{7} c_2 c_4 + \frac{1}{7} c_3^2 \right) h_i^7 + \left(\frac{1}{4} c_2 c_5 + \frac{1}{4} c_3 c_4 \right) h_i^8 \\ & + \left(\frac{2}{9} c_3 c_5 + \frac{1}{9} c_4^2 \right) h_i^9 + \left(\frac{1}{5} c_4 c_5 \right) h_i^{10} + \frac{1}{11} + c_5^2 h_i^{11} \end{aligned} \right]_{h_1}^{h_2} \quad (13)$$

Em que: v = volume individual da árvore (m^3); d = diâmetro à altura do peito (cm); h_i = altura (m) i em que ocorre determinado diâmetro (cm); h_1 = limite inferior da seção (m); h_2 = limite superior da seção (m); $c_0 = \beta_0$; $c_1 = \beta_1 \cdot h^{-1}$; $\beta_2 \cdot h^{-2}$; $\beta_3 \cdot h^{-3}$; $\beta_4 \cdot h^{-4}$; $\beta_5 \cdot h^{-5}$.

Os resultados das estimativas dos diâmetros em diferentes alturas do fuste das árvores de *Pinus* spp. foram avaliados por meio do coeficiente de determinação ajustado R^2_{aj} (14), erro padrão da estimativa em porcentagem $Syx\%$ (6) e da análise gráfica da dispersão dos resíduos (%) (9). Para analisar a acurácia do Polinômio de 5º Grau nas estimativas do volume total, além do $Syx\%$ e do $Resíduos\%$, foram calculadas as estatísticas de viés V (7), desvio padrão das diferenças SD (15), soma

de quadrado do desvio relativo SQRR (16) e da porcentagem dos resíduos RP (17), conforme as recomendações feitas por Figueiredo Filho *et al.* (1996).

$$R_{aj}^2 = 1 - \left[\frac{\left(\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \right) \left(\frac{n-1}{n-p} \right)}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \right] \quad (14)$$

$$SD = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right)^2}{(n-1)^2} \quad (15)$$

$$SQRR = \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right)^2 \quad (16)$$

$$RP = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right)^2}{n} 100 \quad (17)$$

Em que: y_i , \hat{y}_i , \bar{y} , n e p = definidos anteriormente.

3.3.1. Comparação dos métodos de estimativa de diâmetro e volume

Para avaliar a possibilidade de se usar uma única equação para estimar os volumes totais de *Pinus* spp. nas diferentes idades, o teste de identidade L&O, proposto por Leite e Oliveira (2002), foi aplicado aos dados. Esse teste consiste na combinação do teste F de Graybill, do teste t para erro médio e da análise de correlação linear entre os métodos de estimativas.

Com o teste F de Graybill, foi analisada a identidade entre as estimativas provenientes das equações ajustadas por idade e por uma equação geral, ou seja, considerando todos os dados. Esse procedimento foi realizado por meio do ajuste de um modelo de regressão linear simples (18), em que a variável dependente (Y_j) representou o método com os dados não agrupados (modelo por idade) e a variável independente (Y_1) o método com os dados agrupados (modelo geral).

$$Y_j = \beta_0 + \beta_1 Y_1 \quad (18)$$

Em que: Y_j = diâmetro (cm) ou volume total (m^3) no método com dados não agrupados;
 Y_1 = diâmetro (cm) ou volume total (m^3) no método com dados agrupados.

A identidade entre as variáveis foi verificada ao testar a hipótese nula (H_0), em que os coeficientes β_0 e β_1 são estatisticamente iguais a 0 e 1, respectivamente, contra a hipótese alternativa de rejeição (H_1). Portanto, se o valor de F calculado (F_{cal}) for menor que o tabelado (F_α), a hipótese H_0 não é rejeitada, admitindo a identidade entre os dois métodos de ajuste testados. A estatística F de Graybill está apresentada na expressão (19).

$$F_{cal} = \frac{(\beta - \theta)'(Y'Y)(\beta - \theta)}{2QM_{res}} \quad (19)$$

Em que: $\beta = \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \end{pmatrix}$; $\theta = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$; $Y'Y = \begin{bmatrix} n & \sum Y \\ \sum Y & \sum Y^2 \end{bmatrix}$; QM_{res} = quadrado médio do resíduo do método padrão.

O erro médio (\bar{e}) entre os valores estimados pelo método com os dados não agrupados (Y_{ji}) e o método com os dados agrupados (Y_{1i}) é dado na expressão (20).

$$\bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(Y_{ji} - Y_{1i})}{Y_{1i}}}{n} \quad (20)$$

A hipótese nula (H_0) de que o erro médio é estatisticamente igual a zero foi verificada por meio da expressão (21), considerando que os erros seguiram uma distribuição normal. Se o valor de t calculado ($t_{\bar{e}}$) para o erro médio for menor que o tabelado (t_α), a hipótese H_0 não é rejeitada e as diferenças entre os dois métodos são devido ao acaso.

$$t_{\bar{e}} = \frac{\bar{e} - 0}{S\bar{e}} \quad (21)$$

$$S_{\bar{e}} = \frac{S_e}{n^{1/2}} \quad (22)$$

Em que: S_e = desvio padrão do erro; $S_{\bar{e}}$ = desvio padrão médio do erro (22).

O grau de associação entre as estimativas provenientes do método com dados agrupados e o método com os dados não agrupados foi analisado estatisticamente comparando o coeficiente de correlação linear (23) com a diferença de $(1-|\bar{e}|)$, quando $H_0: \bar{e} = 0$ não foi rejeitada.

$$R_{y_j y_1} = \frac{n \sum y_j y_1 - \sum y_j \sum y_1}{\sqrt{n \sum y_j^2 - (\sum y_j)^2} \sqrt{n \sum y_1^2 - (\sum y_1)^2}} \quad (23)$$

3.4. CLASSES DE SORTIMENTOS DE PRODUTOS

As classes de sortimentos utilizadas e os respectivos preços da madeira no mercado foram disponibilizadas pela empresa Juliana Florestal, a qual utiliza como base as informações divulgadas pela Pöyry Silviconsult. Esses valores estão apresentados na TABELA 2 e são dados referentes ao último trimestre do ano 2014.

TABELA 2 – CLASSES DE SORTIMENTOS E PREÇOS DE MERCADO

CLASSES DE SORTIMENTO	DIÂMETRO NA PONTA FINA (cm)	COMPRIMENTO DA SEÇÃO (m)	PREÇO (R\$.m ⁻³)
Resíduos	< 8 cm	-	-
Celulose	≥ 8 < 18	1,60	20,30
Serraria	≥ 18 < 25	2,50	47,20
Serraria especial	≥ 25 < 35	2,50	78,60
Laminação	≥ 35	2,20	133,30

FONTE: Empresa Juliana Florestal LTDA.

3.5. ANÁLISE ECONÔMICA DOS REGIMES DE MANEJO

Os regimes de manejo dos povoamentos também foram avaliados economicamente pelo valor presente líquido (VPL). O VPL pode ser definido como o somatório de todos os valores de um fluxo de caixa, descontados para o ano zero,

usando-se de uma determinada taxa de desconto (SOUZA JUNIOR, 2012). Em outras palavras, é a diferença do valor presente das receitas menos o valor presente dos custos (SILVA; FONTES, 2005).

Esse critério econômico é frequentemente aplicado em análises de viabilidade de empreendimentos florestais, bem como nos modelos de regulação florestal, como pode ser observado nas pesquisas de Gomide *et al.* (2010) e Silva *et al.* (2007). A formulação matemática do VPL está apresentada na expressão (24).

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+i)^t} \quad (24)$$

Em que: C_t = valor líquido do fluxo de caixa no período t ; t = período de capitalização de cada valor de fluxo de caixa; n = duração do projeto (anos); i = taxa de juros (%).

A taxa de juros representa a remuneração a ser paga pela oportunidade de se investir em determinado capital, por um período de tempo específico. Segundo Schoroeder *et al.* (2005), a taxa de juros pode ser definida de acordo com a política de cada empresa, mas o seu valor é de grande importância na decisão e na alocação de recursos nos projetos de investimentos.

A taxa de juros média usada no presente estudo foi de 11% ao ano, a qual foi definido com base nas variações da mesma no ano de 2014, calculadas pelo Sistema Especial de Liquidação e Custódia (SELIC).

3.5.1. Custos de implantação

Os custos referentes a implantação e a manutenção dos povoamentos florestais de *Pinus* spp., bem como das intervenções silviculturais simuladas no presente estudo são valores médios que foram disponibilizados pela empresa Juliana Florestal. O custo das atividades silviculturais em cada idade está apresentado na TABELA 3.

O custo médio de plantio envolveu as atividades de aplicação manual de herbicida, controle de formiga pré e pós-plantio e replantio de mudas. Nos custos de

desbastes, foram desconsiderados os dispêndios de colheita e carregamento mecanizado da madeira, bem como o transporte até a indústria.

TABELA 3 – CUSTO MÉDIO DAS ATIVIDADES SILVICULTURAIS

ATIVIDADE	ANO DE OCORRÊNCIA	CUSTO
Plantio/Manutenção	0	2.000,00 R\$.ha ⁻¹
1° Desbaste	8 a 12	38,00 R\$.ton ⁻¹
2° Desbaste	13 a 17	35,00 R\$.ton ⁻¹
3° Desbaste	18 a 22	33,00 R\$.ton ⁻¹
Corte Raso	≥ 23	30,00 R\$.ton ⁻¹

FONTE: Empresa Juliana Florestal LTDA.

3.6. REGIMES DE MANEJO SIMULADOS

Para realizar a otimização da estrutura volumétrica dos povoamentos florestais e, conseqüentemente, a regulação as áreas de colheita, foram simuladas diferentes alternativas de manejo. Neste estudo, os diferentes regimes de manejo foram configurados para cada talhão, devido as diferentes condições atuais dos mesmos, ou seja, em decorrência das atividades de desbastes e corte raso bastante alteradas em relação a idade mais indicada para serem efetuadas.

A idade de intervenção para executar o primeiro, o segundo e o terceiro desbaste nos talhões de *Pinus* spp. foram definidas para ocorrer aos 10, 15 e 20 anos, respectivamente, e com o corte raso entre 24 e 26 anos. Esse tipo de manejo caracterizou o regime de manejo padrão (MP), definido pela empresa, e que, teoricamente, foi seguido nas áreas a serem replantadas, com a finalidade de tornar a floresta regulada.

Porém, com o objetivo de tornar o modelo mais flexível na primeira rotação dos povoamentos de *Pinus elliottii* (PE) e *Pinus taeda* (PT) implantados anteriormente, visto que os mesmos apresentaram idades de intervenções silviculturais bastante alteradas em relação ao manejo padrão, foram consideradas variações nas idades de desbastes para ± 2 anos. Dessa forma, um talhão apresentou o primeiro desbaste entre 8 a 12 anos, o segundo desbaste entre 13 a 17 anos, o terceiro desbaste entre 18 a 22 anos e o corte raso entre 23 a 27 anos. Foi considerado, também, a restrição de que os desbastes ou corte raso somente ocorressem 3 anos após qualquer atividade silvicultural.

Os povoamentos florestais com idades mais avançadas, ou seja, superior a 27 anos, foram classificados no regime de manejo de exceção (ME), na qual o corte raso foi realizado em até 12 anos. Esse sistema de manejo foi aplicado para evitar que essas áreas fossem todas e integralmente cortadas no primeiro ano do horizonte de planejamento e gerassem possíveis problemas operacionais, por exemplo, elevado número de áreas submetidas a desbastes e/ou corte raso.

3.7. MODELO MATEMÁTICO DE REGULAÇÃO

A abordagem utilizada para resolver o problema de regulação da estrutura dos povoamentos florestais foi realizada conforme o modelo Tipo I proposto por Johnson e Scheurmann (1977).

Diferentes estratégias de otimização foram testadas para avaliar o seu desempenho no processo de regulação, sendo que duas funções objetivo foram de maximização e duas de minimização. Em todas as formulações matemáticas foram aplicadas restrições básicas, além das restrições específicas para os modelos de minimização.

- Função objetivo:

A primeira função objetivo foi modelada para maximizar a produção dos sortimentos dos talhões (25), ou seja, para proporcionar o maior retorno possível dos volumes da floresta.

$$\text{MaxVOL} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \left(X_{ij} \sum_{k=1}^{\text{HP}} \text{VOL}_{ijk} \right) \quad (25)$$

A segunda função objetivo foi modelada para maximizar o valor presente líquido da produção dos sortimentos dos talhões (26), visando obter o maior retorno financeiro possível da floresta.

$$\text{MaxVPL} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (\text{VPL}_{ij} X_{ij}) \quad (26)$$

A terceira função objetivo foi modelada para minimizar a oscilação da produção anual máxima e mínima dos sortimentos provenientes dos talhões (27).

$$\text{MinDIF} = \text{Min}(\text{MinMax} - \text{MaxMin}) \quad (27)$$

A quarta e última função objetivo foi modelada para minimizar os desvios absolutos da produção volumétrica total dos sortimentos dos talhões entre anos consecutivos (28).

$$\text{MinDES} = \text{DESVOL} \quad (28)$$

- Restrições:

A restrição básica de área máxima (29) serviu para indicar a área total de cada unidade de manejo florestal. Essa restrição obrigou que a soma das áreas de uma mesma unidade de manejo, submetida a diferentes alternativas de manejo (idades de desbastes e corte raso), fosse igual a área total de cada unidade de manejo.

$$\sum_{j=1}^N X_{ij} \leq A_i \quad \forall_i \quad (29)$$

A restrição básica de demanda (30) para abastecimento industrial, que representa o consumo interno de madeira, garantiu que o fluxo médio do volume dos sortimentos fosse atingido, o qual foi de 96.000 m³.ano⁻¹, nesta pesquisa. No consumo interno foram utilizados somente os sortimentos para serraria, serraria especial e laminação, a celulose foi destinada exclusivamente para à venda no mercado florestal, enquanto a madeira de resíduos foi desconsiderada na modelagem, pois esse produto fica na floresta e não é comercializado.

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \text{VOL}_{ijk} X_{ij} = 96.000 \quad \forall_k \quad (30)$$

O modelo (27) de otimização requer, juntamente com a função objetivo, as restrições (31) e (32), para garantir a minimização da oscilação da produção anual máxima e mínima dos sortimentos.

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (\text{VOL}_{ijk} X_{ij}) \leq \text{MinMax} \quad \forall_k \quad (31)$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (\text{VOL}_{ijk} X_{ij}) \geq \text{MaxMin} \quad \forall_k \quad (32)$$

As restrições (33) e (34) foram aplicadas no modelo de otimização (28), também juntamente com a função objetivo, para garantir a minimização das diferenças dos desvios absolutos da produção dos sortimentos.

$$\text{VOL}_k - \text{VOL}_{k-1} < \text{DESVOL} \quad \forall_{k>1} \quad (33)$$

$$\text{VOL}_{k-1} - \text{VOL}_k < \text{DESVOL} \quad \forall_{k>1} \quad (34)$$

Em que: HP = horizonte de planejamento; VPL_{ij} = valor presente líquido (R\$) do i-ésimo talhão seguindo a j-ésima alternativa de manejo; VOL_{ijk} = volume comercial (m³) produzido no i-ésimo talhão seguindo a j-ésima alternativa de manejo no período k; MinMax = menor das produções máximas (m³) possíveis no HP; MaxMin = maior das produções mínimas (m³) possíveis no HP; DESVOL = desvio absoluto do volume (m³) em anos subsequentes; X_{ij} = fração de área (ha) do i-ésimo talhão seguindo a j-ésima alternativa de manejo; A_i = área (ha) total do i-ésimo talhão no início do horizonte de planejamento; M = número total de talhões; e N = número total de alternativas de manejo do i-ésimo talhão.

A solução do problema de programação linear proposto na presente pesquisa foi obtida por meio do *software* de planejamento florestal estratégico otimizado OpTimber-LP[®], licenciado gratuitamente para o Laboratório de Manejo Florestal da Universidade Federal do Paraná (UFPR). O *software* realiza internamente chamadas ao simulador de crescimento e produção SisPinus[®], desenvolvido pela Embrapa

Florestas (OLIVEIRA, 1995) e ao LINGO[®], para otimização de problemas de programação linear e não-linear, desenvolvido pela empresa LINDO Systems INC.

Assim, a simulação das diferentes alternativas de manejo de *Pinus* spp. foi realizada por inúmeras chamadas ao SisPinus[®] e gerenciadas pelo OpTimber-LP, permitindo testar quaisquer regimes de manejo que queiram ser aplicados nos povoamentos.

O programa SisPinus[®] foi calibrado com a equação de afilamento de melhor desempenho nesse estudo, com a finalidade de estimar os volumes de madeira para cada classe de diâmetro e, conseqüentemente, fazer os sortimentos de multiprodutos. O índice de sítio de cada unidade de manejo foi obtido a partir da equação de sítio selecionada para cada espécie, com a idade de referência definida para 15 anos, pois é aquela utilizada pelo SisPinus[®]. Posteriormente, os regimes de manejo simulados foram otimizados por meio do programa LINGO[®] e que, por sua vez, utiliza o algoritmo *simplex*, por meio da programação linear (PL), como método de resolução de problemas.

A floresta submetida no processo de regulação apresentou o total de 165 unidades de manejo, com grande variabilidade no tamanho de cada talhão, com dimensões entre 0,83 a 179,87 ha e média de 35,07 ha.

O horizonte de planejamento considerado foi de 50 anos, visando garantir que a floresta ficasse regulada em, aproximadamente, duas rotações.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. CLASSIFICAÇÃO DE SÍTIOS

Na FIGURA 5 pode ser observado o *boxplot* que mostra a evolução da altura dominante ao longo das idades, tanto para *Pinus elliottii* quanto *Pinus taeda*. Existe pequena variação da altura dominante nas idades mais jovens, para ambas as espécies, mas com tendência de aumentar a sua amplitude com o tempo. Exceto para *Pinus taeda* nas idades intermediárias de 13 a 19 anos, o que pode ser atribuído a pequena quantidade de área plantada nessas idades.

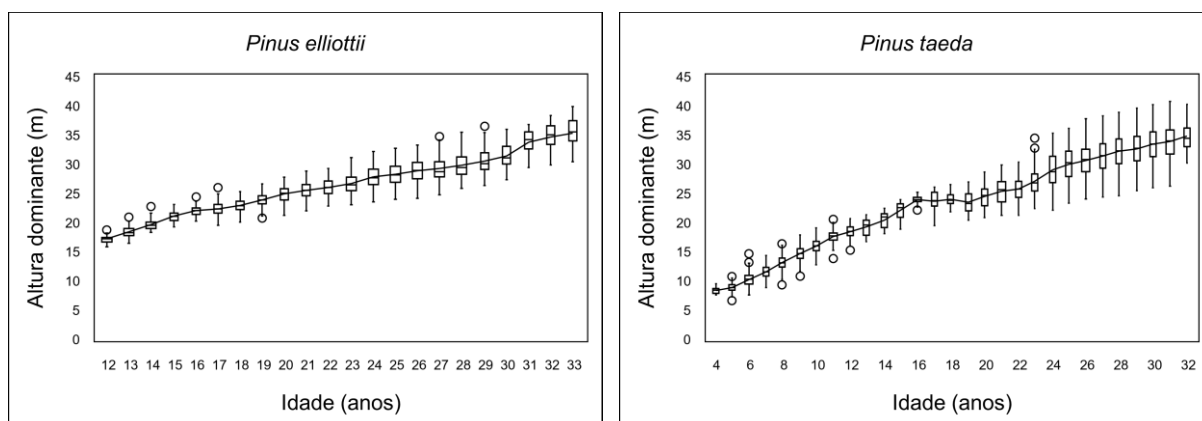


FIGURA 5 – GRÁFICOS BOXPLOT DA ALTURA DOMINANTE EM DIFERENTES IDADES DE *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*., NA REGIÃO DE CAÇADOR, SC

A idade variou de 12 a 33 anos e a altura dominante de 15,9 a 39,9 m para *Pinus elliottii*, na qual o coeficiente de variação (CV%) foi de 19,7% e 14,1% para idade e altura dominante, respectivamente. A amplitude dos dados do *Pinus taeda* foi maior, sendo que a idade variou de 4 a 32 anos e a altura dominante de 6,6 a 40,7 m, mas com CV% igual a 59,8% e 44,7% para idade e altura dominante, respectivamente.

Na TABELA 4 estão os coeficientes estimados dos modelos não lineares testados para classificação de sítios florestais das espécies *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, na região de Caçador, Santa Catarina, juntamente com as respectivas estatísticas de ajuste e precisão dos modelos.

TABELA 4 – COEFICIENTES ESTIMADOS E ESTATÍSTICAS DE AJUSTE E PRECISÃO DOS MODELOS TESTADOS PARA A CLASSIFICAÇÃO DE SÍTIO DE *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, NA REGIÃO DE CAÇADOR, SC

AUTOR	COEFICIENTES	R_{yy}^2	Syx%	V	MSE	AIC	EQ.
<i>Pinus elliottii</i>							
Bailey de 4 Parâmetros	b ₀	41,5634	0,796	6,398	0,002	2,835	2.163,967
	b ₁	0,0603					
	b ₂	0,9536					
	b ₃	1,2162					
Chapman e Richards	b ₀	41,0938	0,795	6,397	-0,003	2,836	2.163,2
	b ₁	-0,0500					
	b ₂	1,1172					
Clutter e Jones	b ₀	41,6092	0,786	6,556	-0,001	2,976	2.265,025
	b ₁	9,5992					
	b ₂	-1,3337					
	b ₃	-3,1656					
Mitscherlich	b ₀	41,2217	0,794	6,438	0,027	2,871	2.189,114
	b ₁	1,1153					
	b ₂	0,0506					
<i>Pinus taeda</i>							
Bailey de 4 Parâmetros	b ₀	41,3750	0,956	9,418	0,047	3,394	8.533,720
	b ₁	0,0001					
	b ₂	2,5875					
	b ₃	0,3043					
Chapman e Richards	b ₀	41,9763	0,954	9,575	0,022	3,509	8.764,167
	b ₁	-0,0516					
	b ₂	1,0781					
Clutter e Jones	b ₀	46,6110	0,944	10,558	0,065	4,266	10.129,523
	b ₁	-0,0652					
	b ₂	-0,8815					
	b ₃	119,7335					
Mitscherlich	b ₀	41,3904	0,954	9,661	-0,028	3,572	8.889,610
	b ₁	1,0214					
	b ₂	0,0508					

Em que: b_s = coeficientes estimados; R_{yy}^2 = coeficiente de correlação ao quadrado; Syx% = erro padrão da estimativa em porcentagem; V = viés (m); MSE = erro quadrático; AIC = critério de informação de Akaike.

O coeficiente de correlação ao quadrado (R_{yy^2}) apresentou valores mais elevados para *Pinus taeda*, os quais ficaram situados entre 0,94 a 0,95. Por outro lado, o *Pinus elliottii* resultou em valores de R_{yy^2} mais baixos, contidos entre 0,78 a 0,79, o que indica uma menor correlação entre as variáveis.

O erro padrão da estimativa foi próximo de 6% para *Pinus elliottii* em todos os modelos ajustados, enquanto para *Pinus taeda* esses valores foram superiores a 9%. De modo geral, os valores de viés (V), erro quadrático (MSE) e do critério de informação de Akaike (AIC) também foram melhores para *Pinus elliottii*. Esses resultados obtidos estão diretamente relacionados com a menor amplitude de variação nos dados dessa espécie, o que favorece em estimativas mais precisas da altura dominante.

David *et al.* (2015) utilizaram o método da curva-guia para classificar os sítios florestais de *Pinus taeda*, localizados na região Sul do Brasil, e ajustaram diversos modelos não lineares, mas, diferentemente do presente estudo, os valores do R^2_{aj} variaram de 0,80 a 0,81 e os $Syx\%$ foram próximos de 12%.

De modo geral, a dispersão dos resíduos foi mais homogênea para *Pinus elliottii*, com baixa amplitude de variação e sem tendenciosidades aparentes nas estimativas de altura dominante. Porém, foram observadas subestimativas e superestimativas mais evidentes para *Pinus taeda*, com valores superiores a $\pm 40\%$, nas idades inferiores a 12 anos, como pode ser observado na FIGURA 6.

Todos os modelos ajustados apresentaram desempenho bastante similar, exceto o de Clutter e Jones, e qualquer um pode ser utilizado para classificação de sítios florestais de ambas as espécies. O modelo de Bailey de 4 Parâmetros resultou no desempenho ligeiramente melhor para *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, em virtude do maior R_{yy^2} e os menores valores nas estatísticas de $Syx\%$, MSE e AIC, exceto para o viés (V) obtido no *Pinus taeda*, quando comparado com os demais modelos testados, além da dispersão gráfica dos resíduos mais satisfatória. Esse resultado pode ser atribuído à sua grande flexibilidade, pois o mesmo apresenta quatro parâmetros.

O modelo de Chapman e Richards apresentou as estatísticas de precisão e a dispersão de resíduos satisfatórias, sendo, de modo geral, ligeiramente inferiores ao de Bailey de 4 Parâmetros. Contudo, os resultados desse modelo foram um pouco inferiores aos obtidos por Scolforo e Machado (1988) na classificação de sítio de *Pinus taeda* nos estados do Paraná e Santa Catarina, e também em relação aos de Oliveira *et al.* (1998) na classificação de sítio de *Pinus elliottii* na região Sul do Brasil.

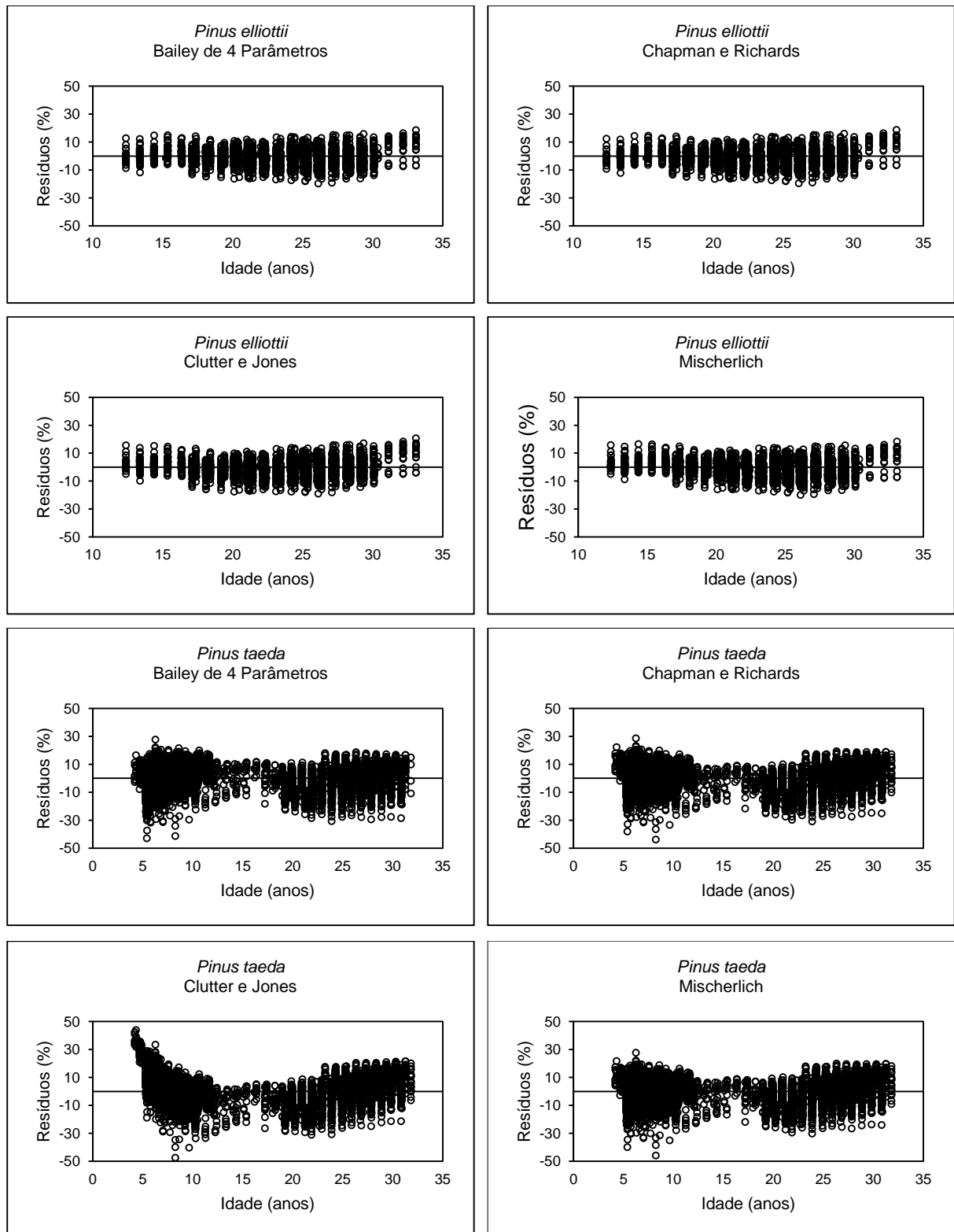


FIGURA 6 – DISPERSÃO DOS RESÍDUOS PARA OS MODELOS TESTADOS NA CLASSIFICAÇÃO DE SÍTIOS DE *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, NA REGIÃO DE CAÇADOR, SC

O modelo de Mitscherlich apresentou resultados semelhantes aos de Bailey de 4 Parâmetros e Chapman e Richards, tanto nas estatísticas de precisão quanto na dispersão gráfica de resíduos. Os piores resultados foram obtidos com o modelo de Clutter e Jones, além de apresentar as maiores tendenciosidades nas estimativas, principalmente para *Pinus taeda*, mostrou-se inadequado para classificar os sítios florestais e gerar as curvas de índice de sítio.

A partir da seleção do modelo de melhor desempenho, que, neste caso, foi o de Bailey de 4 Parâmetros para ambas as espécies, foram construídas as curvas de índice de sítio para idade de referência de 15 anos (FIGURA 7). A amplitude das classes foi de 3,3 e 3,8 m para *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, respectivamente.

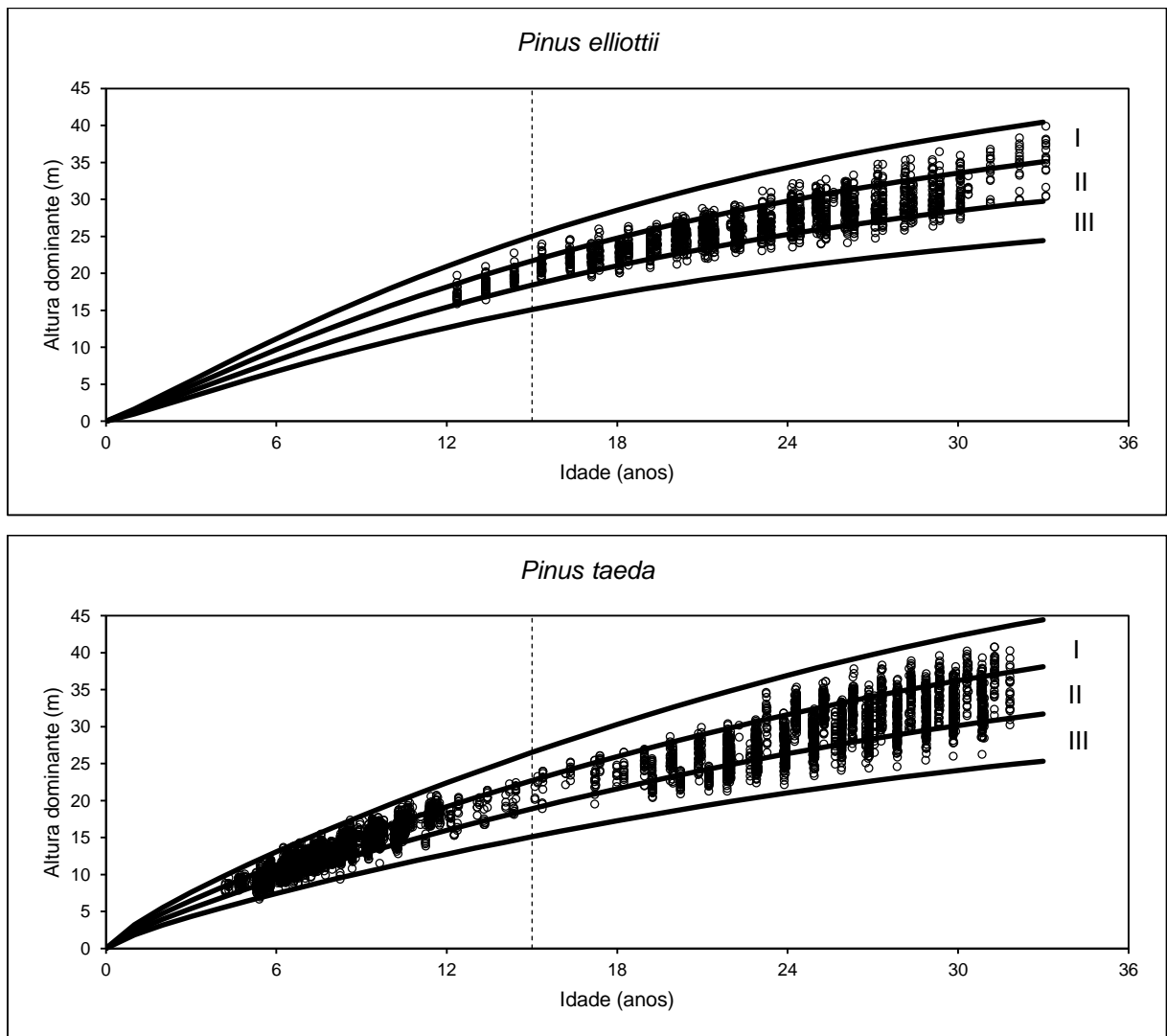


FIGURA 7 – CURVAS DE ÍNDICE DE SÍTIO PARA *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, NA REGIÃO DE CAÇADOR, SC

As curvas construídas para *Pinus taeda* foram notadamente mais inclinadas, indicando que o crescimento em altura dominante dessa espécie foi superior ao do *Pinus elliottii*. No entanto, outros fatores podem ter influenciado nesses resultados, como, por exemplo, predomínio de plantio do *Pinus taeda* em sítios melhores, diferentes técnicas de plantio, condução silvicultural dos povoamentos, material genético utilizado, entre outros.

As curvas de índice de sítio das duas espécies também foram mais inclinadas nas idades mais jovens, indicando um crescimento em altura dominante mais intenso em relação as idades mais avançadas.

Ainda na FIGURA 7, é possível observar que na classe intermediária, ou na classe II, ficaram concentradas a maior parte dos pares de idade e altura dominante para as duas espécies, seguido da classe I (superior) e III (inferior).

Para *Pinus elliottii* foram obtidos dados somente a partir dos 12 anos, o que impossibilitou uma análise mais detalhada sobre o comportamento do crescimento inicial em altura dominante dessa espécie. Por outro lado, o *Pinus taeda* apresentou dados na maior parte das idades consideradas, mas com poucos valores situados entre 12 a 18 anos.

Os limites inferior e superior das alturas dominantes de cada espécie por classe de sítio e idade estão apresentados na TABELA 15.

A altura dominante do *Pinus elliottii* variou de 15,1 a 25,0 m na idade de referência de 15 anos e os índices de sítio foram 23,4, 20,1 e 16,8 m para as classes I, II e III, respectivamente. A amplitude de variação foi um pouco maior no *Pinus taeda*, com valores entre 15,1 a 26,5 m, enquanto os índices de sítio foram 24,6, 20,8 e 17,0 m para as classes I, II e III, respectivamente.

Oliveira *et al.* (1998) encontraram variação na altura dominante de 16,0 a 29,8 m, em três classes de sítio para povoamentos de *Pinus elliottii* localizados na região Sul do Brasil, aos 15 anos de idade. Semelhante a esse resultado, David *et al.* (2015) encontraram amplitude de variação na altura dominante de *Pinus taeda* no Sul do Brasil de 10,5 a 30,3 m em quatro classes de sítio, também aos 15 anos de idade. A maior amplitude de variação encontrado por esses autores pode ser atribuída a maior variabilidade dos dados usados pelos mesmos, em comparação aos do presente estudo.

TABELA 5 – LIMITE INFERIOR (LI) E LIMITE SUPERIOR (LS) DAS CLASSES DE SÍTIO DE *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, NA REGIÃO DE CAÇADOR, SC

IDADE (anos)	<i>Pinus elliottii</i>						<i>Pinus taeda</i>					
	CLASSE III		CLASSE II		CLASSE I		CLASSE III		CLASSE II		CLASSE I	
	LI	LS	LI	LS	LI	LS	LI	LS	LI	LS	LI	LS
4	4,5	5,4	5,5	6,3	6,4	7,4	5,4	6,7	6,8	8,1	8,2	9,5
5	5,6	6,8	6,9	8,0	8,1	9,3	6,5	8,0	8,1	9,6	9,7	11,3
6	6,7	8,1	8,2	9,6	9,7	11,2	7,5	9,2	9,3	11,1	11,2	13,1
7	7,8	9,4	9,5	11,1	11,2	13,0	8,4	10,4	10,5	12,5	12,6	14,8
8	8,9	10,7	10,8	12,6	12,7	14,7	9,3	11,6	11,7	13,9	14,0	16,4
9	9,8	11,9	12,0	14,1	14,2	16,3	10,2	12,7	12,8	15,3	15,4	17,9
10	10,8	13,1	13,2	15,5	15,6	17,9	11,1	13,8	13,9	16,6	16,7	19,5
11	11,8	14,2	14,3	16,8	16,9	19,5	11,9	14,8	14,9	17,8	17,9	21,0
12	12,7	15,3	15,4	18,1	18,2	21,0	12,8	15,9	16,0	19,1	19,2	22,4
13	13,5	16,4	16,5	19,3	19,4	22,4	13,6	16,9	17,0	20,3	20,4	23,8
14	14,3	17,4	17,5	20,5	20,6	23,7	14,3	17,9	18,0	21,5	21,6	25,2
15	15,1	18,5	18,4	21,6	21,7	25,0	15,1	18,8	18,9	22,6	22,7	26,5
16	15,9	19,2	19,3	22,7	22,8	26,2	15,8	19,7	19,8	23,7	23,8	27,8
17	16,6	20,1	20,2	23,7	23,8	27,4	16,6	20,6	20,7	24,8	24,9	29,1
18	17,2	20,9	21,0	24,7	24,8	28,6	17,3	21,5	21,6	25,9	26,0	30,3
19	17,9	21,7	21,8	25,6	25,7	29,6	17,9	22,4	22,5	26,9	27,0	31,5
20	18,5	22,5	22,6	26,5	26,6	30,7	18,6	23,2	23,3	27,9	28,0	32,6
21	19,1	23,2	23,3	27,4	27,5	31,6	19,2	24,0	24,1	28,8	28,9	33,8
22	19,7	23,9	24,0	28,2	28,3	32,6	19,9	24,8	24,9	29,8	29,9	34,9
23	20,2	24,5	24,6	29,0	29,1	33,5	20,5	25,5	25,6	30,7	30,8	35,9
24	20,7	25,2	25,3	29,7	29,8	34,3	21,0	26,2	26,3	31,5	31,6	36,9
25	21,2	25,8	25,9	30,4	30,5	35,1	21,6	26,9	27,0	32,4	32,5	37,9
26	21,7	26,3	26,4	31,1	31,2	35,9	22,1	27,6	27,7	33,2	33,3	38,9
27	22,1	26,9	27,0	31,7	31,8	36,7	22,7	28,3	28,4	34,0	34,1	39,8
28	22,6	27,4	27,5	32,3	32,4	37,4	23,2	28,9	29,0	34,7	34,8	40,6
29	23,0	27,9	28,0	32,9	33,0	38,0	23,6	29,5	29,6	35,4	35,5	41,5
30	23,4	28,4	28,5	33,5	33,6	38,7	24,1	30,1	30,2	36,1	36,2	42,3
31	23,7	28,8	28,9	34,0	34,1	39,3	24,5	30,6	30,7	36,8	36,9	43,0
32	24,1	29,2	29,3	34,5	34,6	39,9	24,9	31,1	31,2	37,4	37,5	43,8
33	24,4	29,7	29,8	35,0	35,1	40,4	25,3	31,6	31,7	38,0	38,1	44,5

4.1.1. Confiabilidade das curvas de sítio

O teste de anamorfismo foi aplicado para verificar se as curvas de sítio estimadas pelo modelo de Bailey de 4 Parâmetros realmente apresentaram o padrão anamórfico. Dessa forma, o modelo (1) foi reajustado isolando a variável independente índice de sítio (IS). A solução algébrica para isolar a variável independente foi realizada da seguinte forma:

$$h_{\text{dom}} = \beta_0 \left(1 - \exp^{-\beta_1 I^{\beta_2}} \right)^{\beta_3} \quad (1)$$

Isolando o coeficiente β_0 :

$$\beta_0 = \frac{h_{\text{dom}}}{\left(1 - \exp^{-\beta_1 I^{\beta_2}} \right)^{\beta_3}} \quad (1.1)$$

Considerando que o índice de sítio é obtido na idade de referência, então:

$$IS = \beta_0 \left(1 - \exp^{-\beta_1 I_r^{\beta_2}} \right)^{\beta_3} \quad (1.2)$$

Substituindo a expressão (1.2) em (1.1):

$$IS = h_{\text{dom}} \frac{\left(1 - \exp^{-\beta_1 I_r^{\beta_2}} \right)^{\beta_3}}{\left(1 - \exp^{-\beta_1 I^{\beta_2}} \right)^{\beta_3}} \quad (1.3)$$

A partir da expressão (1.3) foi possível estimar o índice de sítio para qualquer idade em função da altura dominante e a idade de referência pré-estabelecida. Esse procedimento foi aplicado para *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, pois o mesmo modelo foi selecionado para ambas as espécies.

A relação linear entre altura dominante e índice de sítio nas idades de 12, 15, 25 e 30 anos para *Pinus elliottii* e nas idades de 10, 15, 25 e 30 anos para *Pinus taeda* pode ser observada na FIGURA 8.

O coeficiente de determinação ajustado resultou em valor igual a 1 em todas as idades e para as duas espécies. Enquanto o ajuste do modelo linear (11) mostrou que o coeficiente de interseção (b_0) foi muito próximo de zero em todas as idades consideradas. O coeficiente angular (b_1) apresentou tendência de reduzir o seu valor em função do avanço da idade, sendo igual a 1 na idade de referência, ou seja, aos 15 anos, indicando uma perfeita correlação entre as variáveis, como pode ser claramente observado na FIGURA 9.

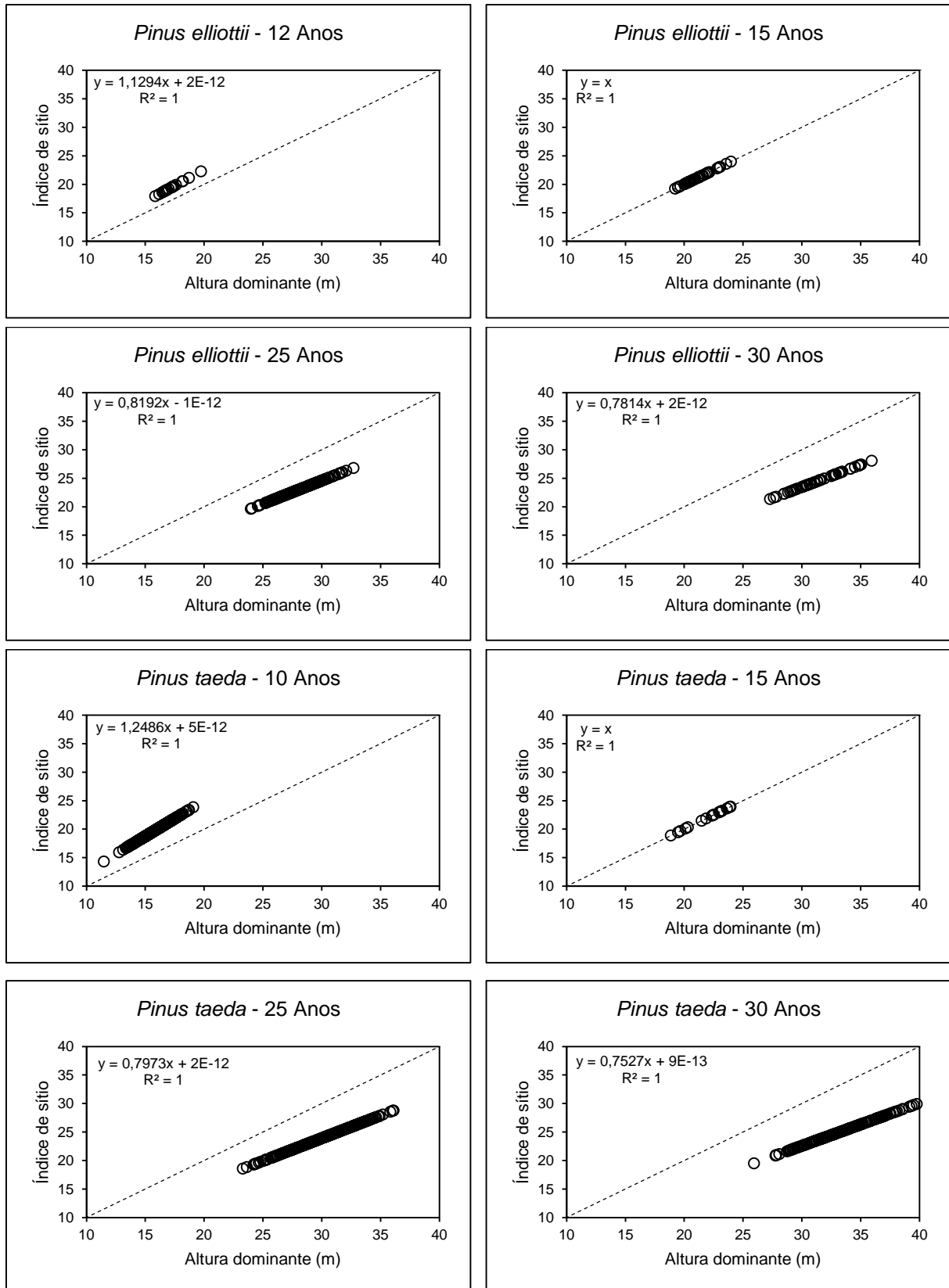


FIGURA 8 – RELAÇÃO LINEAR ENTRE ÍNDICE DE SÍTIO E ALTURA DOMINANTE EM DIFERENTES IDADES DE *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, NA REGIÃO DE CAÇADOR, SC

Assim, esses resultados confirmaram que há forte relação linear entre as variáveis, corroborando o fato de que o índice de sítio é dependente apenas da capacidade produtiva do local, ou seja, da altura dominante das árvores, e não da idade.

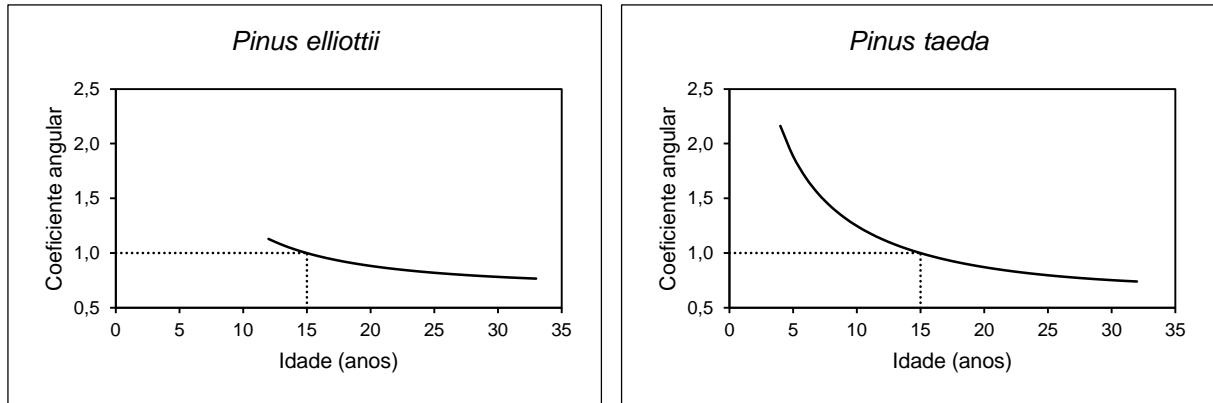


FIGURA 9 – COEFICIENTE ANGULAR EM DIFERENTES IDADES DE *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, NA REGIÃO DE CAÇADOR, SC

Semelhante ao presente estudo, o padrão anamórfico das curvas de sítio também foi verificado nos estudos de Scolforo e Machado (1998), Selle *et al.* (1994), Téó *et al.* (2011) e David *et al.* (2015) em povoamentos de *Pinus spp.*, na região Sul do Brasil, enquanto Machado *et al.* (2011) observaram essa tendência em florestas nativas de *Mimosa scabrella* Benth., no estado do Paraná. Esses resultados indicaram que o anamorfismo das curvas índice de sítio é o padrão mais comum de ocorrência para essas espécies.

4.2. AJUSTE DO MODELO DE AFILAMENTO

Na TABELA 6 estão disponíveis os limites de variação e a estatística descritiva das 532 árvores de *Pinus spp.* selecionadas para cubagem. Os dados de cubagem utilizados nessa pesquisa apresentaram grande amplitude de variação, na qual foram amostradas árvores de 4 a 30 anos de idade. De modo geral, a altura total apresentou menor coeficiente de variação (CV%), seguido pelas variáveis diâmetro à altura do peito e volume individual.

TABELA 6 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS DE DIÂMETRO, ALTURA TOTAL E VOLUME INDIVIDUAL DE *Pinus* spp., NA REGIÃO DE CAÇADOR, SC

IDADE (ANOS)	N	Diâmetro à altura do peito (cm)				Altura total (m)				Volume individual (m ³)			
		MÍNIMO	MÉDIA	MÁXIMO	CV%	MÍNIMO	MÉDIA	MÁXIMO	CV%	MÍNIMO	MÉDIA	MÁXIMO	CV%
4	30	3,90	8,60	14,50	37,79	3,10	5,28	7,40	22,66	0,0035	0,0208	0,052	69,90
5	35	3,70	11,42	19,42	37,59	3,37	7,03	10,10	24,36	0,0033	0,0532	0,156	77,84
6	51	2,90	13,21	23,00	39,15	4,08	8,72	12,70	23,14	0,0019	0,0790	0,227	73,85
7	60	3,90	15,19	23,10	32,64	5,10	9,77	12,80	18,59	0,0043	0,1038	0,244	58,51
8	30	4,00	16,25	26,00	41,89	5,17	12,41	16,25	25,21	0,0041	0,1395	0,350	76,57
9	30	7,70	19,46	32,00	36,64	7,90	13,98	16,80	17,94	0,0196	0,2174	0,494	69,57
10	59	6,00	19,69	32,50	28,21	8,30	14,71	17,80	13,29	0,0124	0,2494	0,659	56,42
11	30	8,20	19,60	31,70	39,16	9,22	14,81	18,80	19,75	0,0212	0,2503	0,578	73,43
12	30	12,50	24,45	35,50	33,08	14,90	19,23	22,60	12,64	0,0743	0,4317	0,986	65,72
14	29	13,37	23,95	36,92	26,20	15,80	18,88	21,70	8,01	0,1384	0,5002	1,074	51,45
16	23	15,60	22,99	37,56	23,97	16,20	19,45	22,30	8,91	0,1651	0,4653	1,161	52,21
18	36	15,92	27,43	48,06	32,14	17,30	22,73	30,20	22,19	0,2234	0,8262	2,141	61,71
21	65	21,65	35,00	49,97	17,92	21,50	28,98	33,00	6,31	0,5099	1,4904	3,026	35,82
27	12	21,96	29,31	38,83	19,62	25,40	28,87	32,80	7,64	0,5982	1,1342	2,118	43,62
30	12	22,60	35,86	51,88	25,02	27,30	29,23	32,00	5,04	0,6134	1,7594	3,385	49,49

Em que: CV% = coeficiente de variação (%).

4.2.1. Estimativas de diâmetro e volume

Os coeficientes do modelo polinomial de 5º Grau ajustado para estimar os diâmetros ao longo do fuste das árvores de *Pinus* spp. apresentaram significância estatística (para p-valor $\leq 0,05$), tanto para o método com agrupamento dos dados quanto para o método sem agrupamento (TABELA 7).

TABELA 7 – COEFICIENTES ESTIMADOS E ESTATÍSTICAS DE AJUSTE E PRECISÃO DA FUNÇÃO DE AFILAMENTO AJUSTADA PARA ESTIMAR OS DIÂMETROS DE *Pinus* spp., NA REGIÃO DE CAÇADOR, SC

IDADE (anos)	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	R ² _{aj}	Syx%
Método sem agrupamento								
4	1,411*	-2,242*	5,307*	-15,542*	19,438*	-8,366*	0,96	12,12
5	1,375*	-3,913*	16,230*	-38,525*	39,692*	-14,854*	0,98	8,55
6	1,338*	-3,799*	14,989*	-35,394*	36,599*	-13,727*	0,99	8,50
7	1,304*	-3,630*	13,618*	-30,181*	29,456*	-10,566*	0,99	7,66
8	1,257*	-3,648*	13,274*	-29,276*	29,594*	-11,199*	0,98	8,32
9	1,272*	-3,934*	14,114*	-29,698*	28,777*	-10,529*	0,99	7,56
10	1,208*	-3,080*	11,789*	-25,746*	24,713*	-8,884*	0,98	7,51
11	1,222*	-3,187*	10,993*	-22,908*	21,711*	-7,829*	0,98	8,80
12	1,185*	-3,560*	13,333*	-28,594*	27,816*	-10,181*	0,98	7,64
14	1,196*	-3,360*	14,790*	-33,118*	32,026*	-11,533*	0,99	6,87
16	1,186*	-3,381*	14,372*	-30,910*	29,127*	-10,394*	0,98	6,87
18	1,210*	-4,001*	17,670*	-38,410*	36,534*	-13,018*	0,98	8,22
21	1,167*	-3,374*	13,667*	-27,331*	23,576*	-7,713*	0,99	6,37
27	1,181*	-3,424*	14,621*	-30,802*	28,613*	-10,194*	0,98	6,49
30	1,181*	-3,383*	13,607*	-26,660*	23,210*	-7,963*	0,99	6,57
Método com agrupamento								
-	1,258*	-3,580*	14,154*	-31,325*	30,688*	-11,195*	0,98	10,96

Em que: b_s = coeficientes estimados; R²_{aj} = coeficiente de determinação ajustado; Syx% = erro padrão da estimativa em porcentagem; * = significativo para p-valor $\leq 0,05$.

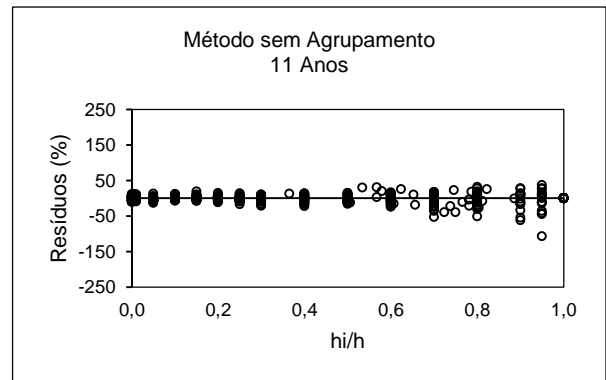
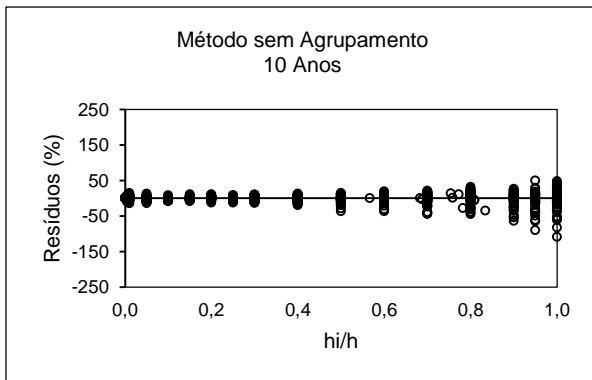
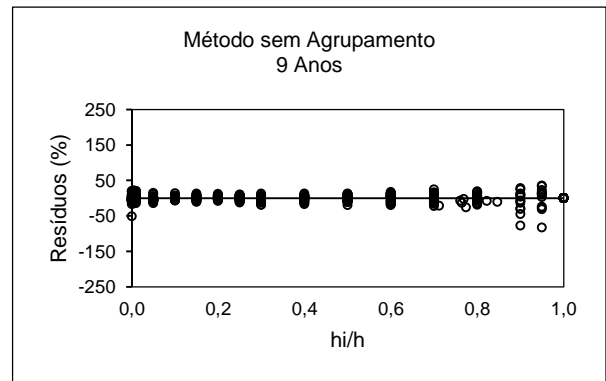
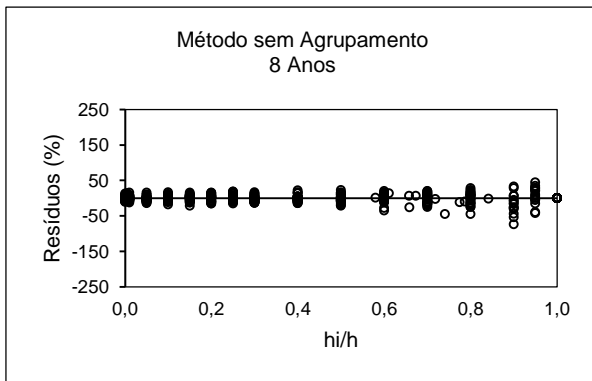
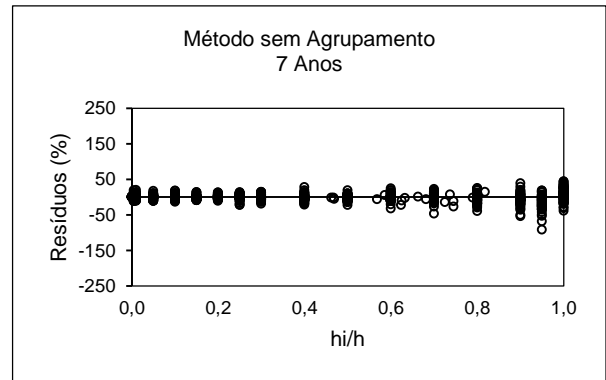
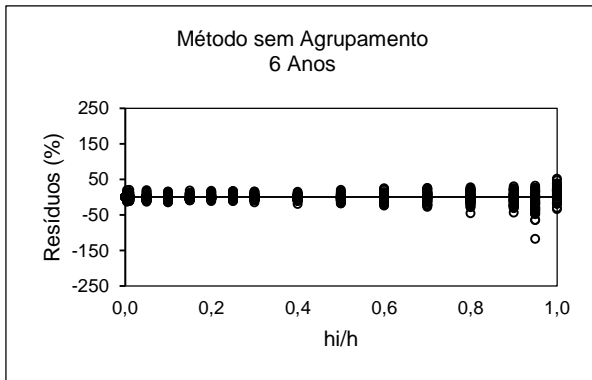
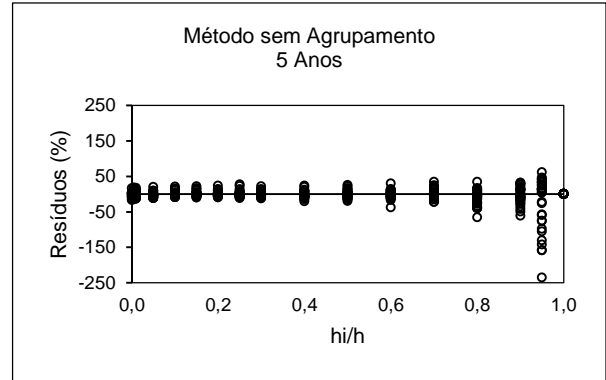
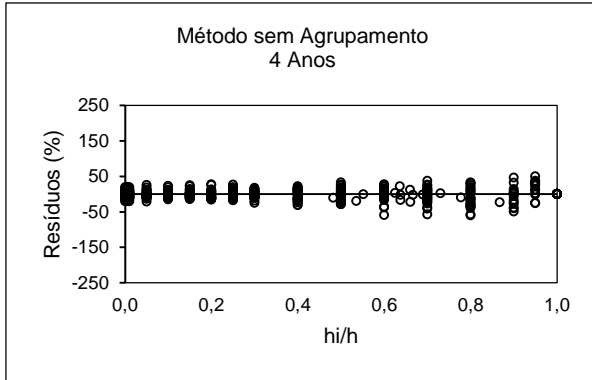
Os resultados obtidos caracterizaram um desempenho satisfatório nas estimativas de diâmetro provenientes do polinômio de 5º Grau, pois o coeficiente de determinação ajustado (R²_{aj}) apresentou valores bastante elevados em todas as idades do método com os dados não agrupados e para equação geral, os quais variaram de 0,96 a 0,99, enquanto o erro padrão da estimativa em porcentagem (Syx%) resultou em valores baixos, com variações de 6 a 12%.

No método sem agrupamento dos dados também foi verificado uma ligeira tendência de melhoria nas estatísticas de ajuste e precisão, em função do aumento da idade das árvores. Semelhante a esse resultado, Friedl (1989) também notou que a precisão do ajuste das equações apresentava uma leve tendência de melhoria com o avanço da idade para *Araucaria angustifolia*. Ainda, o autor destacou que essa tendência pode estar relacionada com a melhor distribuição dos pontos amostrados no perfil ao aumentar a altura da árvore com a idade, e também com a mudança na forma das árvores com a idade.

Por outro lado, Kohler *et al.* (2013) ajustaram o polinômio de 5° Grau e o polinômio de potências fracionárias e inteiras para estimar os diâmetros de *Pinus taeda*, localizados na região serrana de Santa Catarina, sendo que esse último apresentou estatísticas um pouco superiores, indicando bons ajustes em todas as classes de idade. Os valores de R^2_{aj} encontrados pelos autores na equação de melhor desempenho foram em torno de 0,98 e os valores de $Syx\%$ foram próximos de 6,5%, os quais são semelhantes aos resultados obtidos nesse estudo.

Os resíduos se distribuíram de forma mais homogênea na porção basal das árvores, os quais foram bastante próximos ao eixo das abcissas, indicando estimativas acuradas do diâmetro (FIGURA 10). Porém, foram observadas tendências de superestimar os diâmetros mais próximos da altura total da árvore, tendo em vista da maior amplitude de variação dos resíduos, mas ocorrendo de forma mais acentuada a partir de 80% da altura, para ambos os métodos avaliados.

A menor precisão nas estimativas de diâmetro em função do aumento da altura total da árvore também é frequentemente observada em outros trabalhos. Silva *et al.* (2011) ajustaram diversos modelos de afilamento para estimar o diâmetro ao longo do fuste de *Pinus caribaea var. hondurensis*, na região do Triângulo Mineiro, Minas Gerais, na qual foram encontradas grande dispersão dos resíduos devido ao aumento da altura. Para Téo *et al.* (2013), o polinômio de potências fracionárias e inteiras apresentou resíduos com maior amplitude de variação nas estimativas de diâmetro a partir de 70% da altura total de *Pinus elliottii*, com idades de 10 e 18 anos, localizados na região de Caçador, Santa Catarina. Enquanto Kohler *et al.* (2013) observaram que o polinômio de 5° Grau apresentou tendência de subestimar os diâmetros na porção superior do fuste das árvores de *Pinus taeda*, e o polinômio de Potências Fracionárias e Inteiras resultou em melhor dispersão residual.



continua...

conclusão...

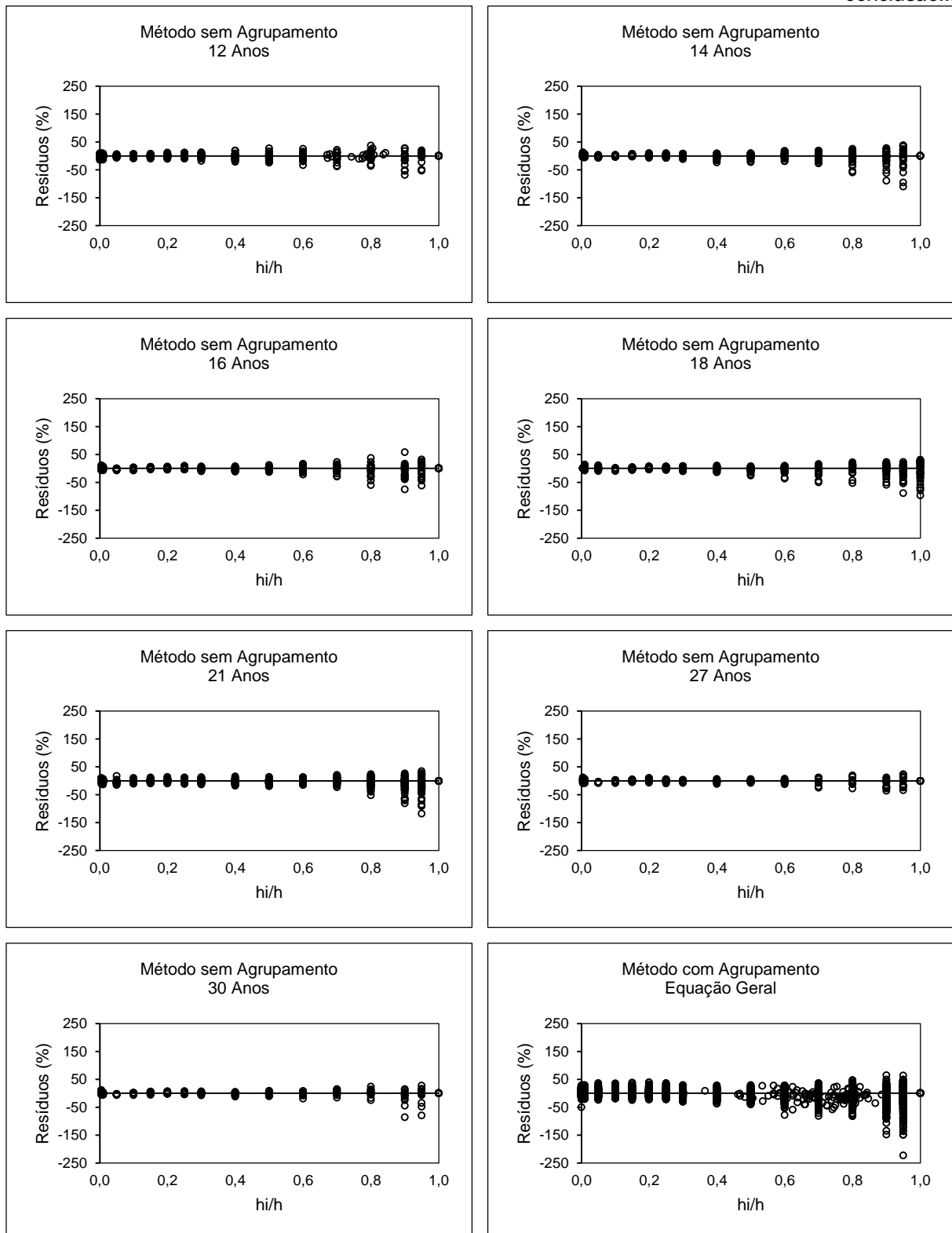


FIGURA 10 – DISPERSÃO DE RESÍDUOS DA FUNÇÃO DE AFILAMENTO TESTADA PARA ESTIMAR OS DIÂMETROS DE *Pinus* spp., COM E SEM AGRUPAMENTO DOS DADOS, NA REGIÃO DE CAÇADOR, SC

Na TABELA 8 estão apresentadas as estatísticas de precisão calculadas para avaliar o desempenho do polinômio de 5º Grau em estimar o volume total com casca das árvores de *Pinus* spp., no método sem agrupamento e com agrupamento dos dados. De modo geral, as estatísticas de precisão foram ligeiramente superiores para os modelos ajustados sem agrupamento dos dados, quando comparadas com aquelas do método com agrupamento.

TABELA 8 – ESTATÍSTICAS DE PRECISÃO DA FUNÇÃO DE AFILAMENTO AJUSTADA PARA ESTIMAR O VOLUME TOTAL COM CASCA DE *Pinus* spp., NA REGIÃO DE CAÇADOR, SC

IDADE (anos)	Syx%	V	SD	SQRR	PR
Método sem agrupamento					
4	27,61	-0,003	0,00003	1,076	-2,230
5	10,44	0,001	0,00014	0,491	5,150
6	10,94	0,001	0,00020	0,653	5,999
7	13,73	0,000	0,00026	1,034	3,846
8	17,66	-0,012	0,00134	0,529	-1,243
9	11,68	-0,006	0,00267	0,271	-0,644
10	14,73	0,007	0,00141	1,156	2,778
11	14,25	-0,005	0,00370	0,346	-0,640
12	13,27	0,006	0,00916	0,234	-0,161
14	11,78	0,030	0,01060	0,312	7,107
16	10,26	0,025	0,01228	0,229	7,065
18	13,70	0,034	0,02832	0,453	7,011
21	11,47	0,099	0,03507	0,687	6,883
27	12,87	0,065	0,13658	0,098	6,621
30	12,76	0,080	0,35933	0,117	6,292
Método com agrupamento					
4	13,39	0,002	0,00002	1,531	16,581
5	19,46	0,008	0,00010	1,343	17,239
6	10,48	0,003	0,00019	0,811	8,470
7	13,66	0,001	0,00026	1,041	4,069
8	32,81	-0,028	0,00163	1,063	-11,862
9	24,60	-0,033	0,00334	0,819	-12,658
10	14,82	0,003	0,00145	1,155	1,257
11	21,52	-0,024	0,00428	0,600	-8,199
12	29,70	-0,084	0,01345	1,710	-21,344
14	14,47	0,048	0,00979	0,487	10,728
16	12,05	0,038	0,01154	0,333	9,926
18	13,74	0,048	0,02732	0,537	8,667
21	10,69	0,078	0,03613	0,586	5,478
27	18,71	0,128	0,12110	0,215	12,072
30	19,25	0,208	0,30635	0,277	13,475

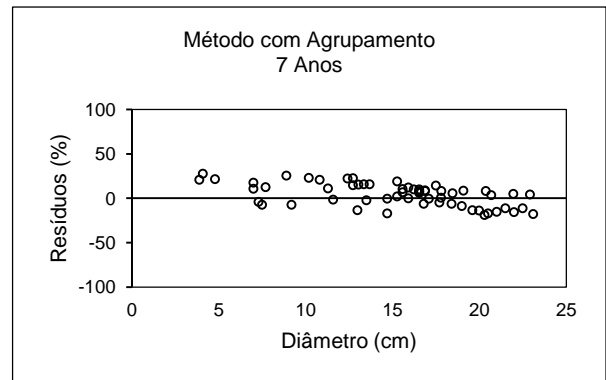
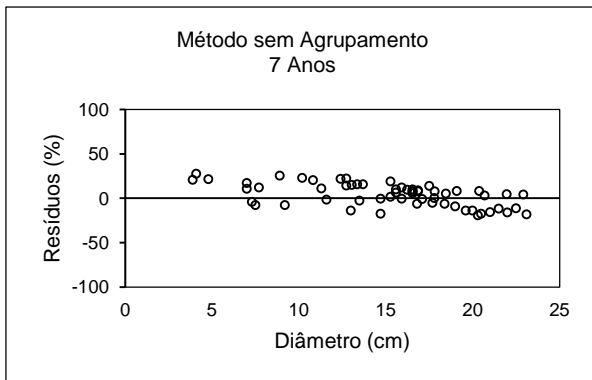
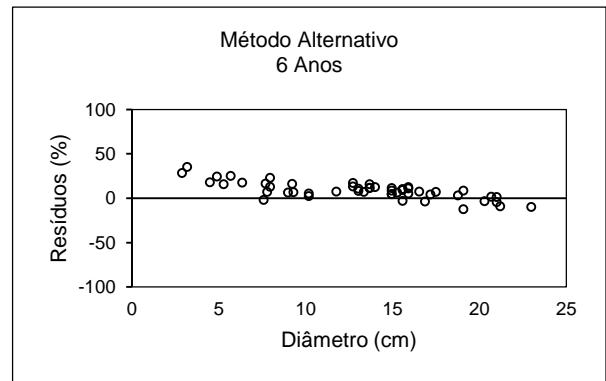
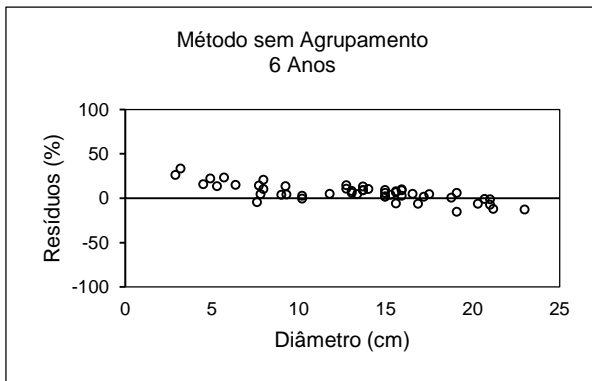
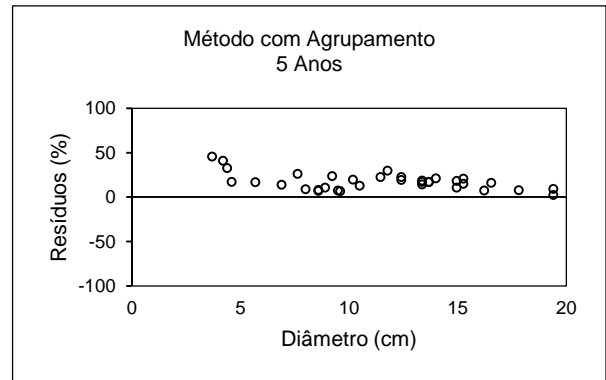
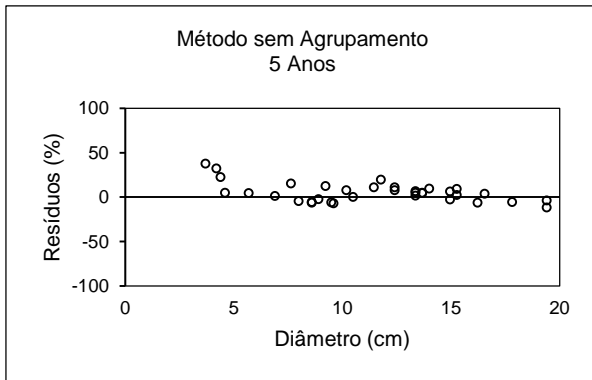
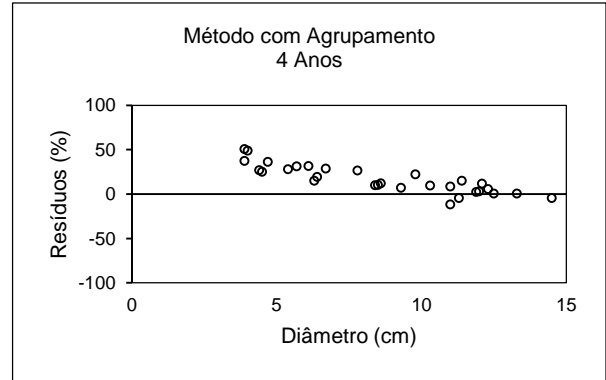
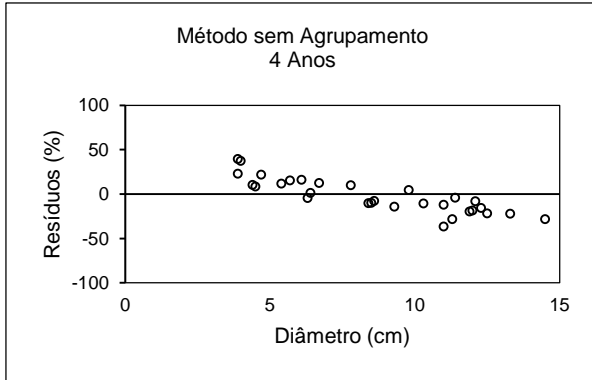
Em que: Syx% = erro padrão da estimativa em porcentagem; V = viés; SD = desvio padrão das diferenças; SQRR = soma do quadrado do desvio relativo; PR = porcentagem dos resíduos.

Quando foram analisados os gráficos de dispersão dos resíduos para o volume total estimado (FIGURA 11), constatou-se fortes tendências em subestimar ou superestimar os volumes em quase todas as idades e para ambos os métodos testados, mas com os resíduos contidos sempre entre $\pm 50\%$. O modelo geral, proveniente do método com agrupamento de dados, apresentou dispersão dos resíduos muito semelhante ao método sem agrupamento de dados em todas as idades analisadas.

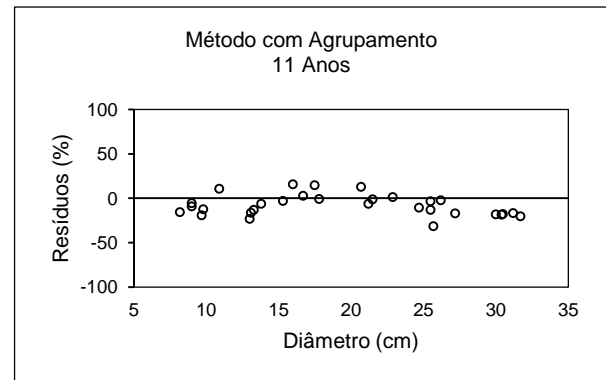
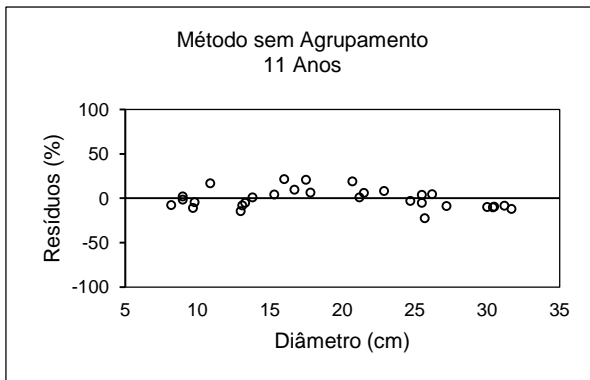
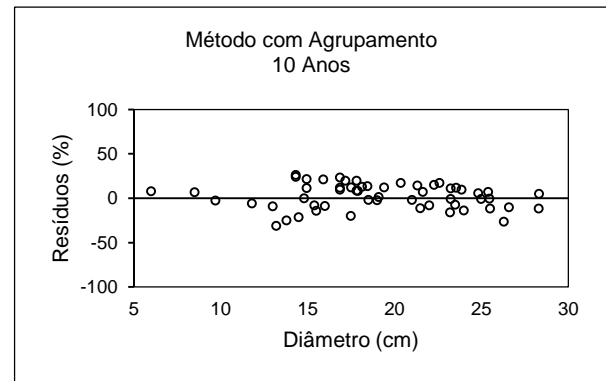
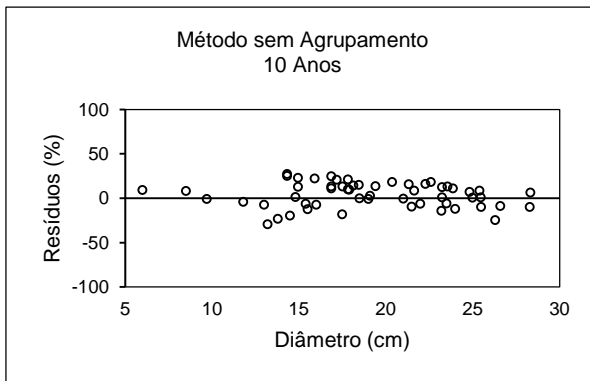
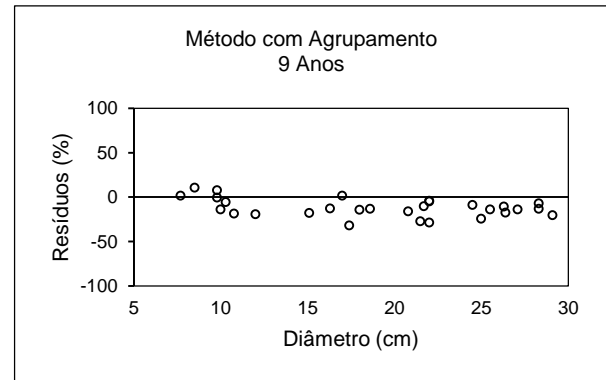
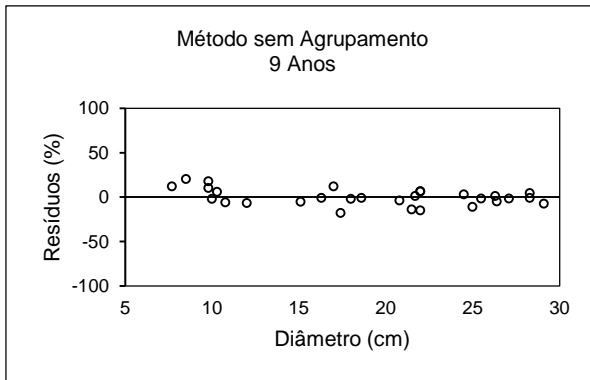
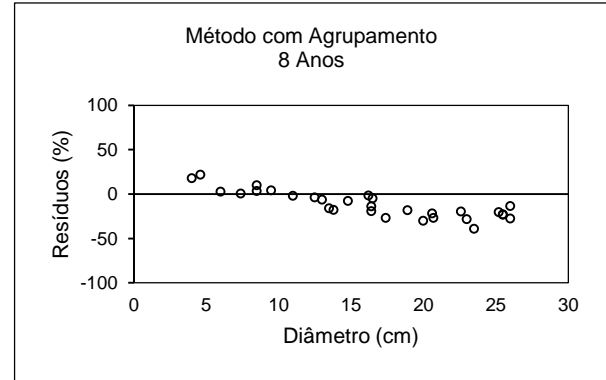
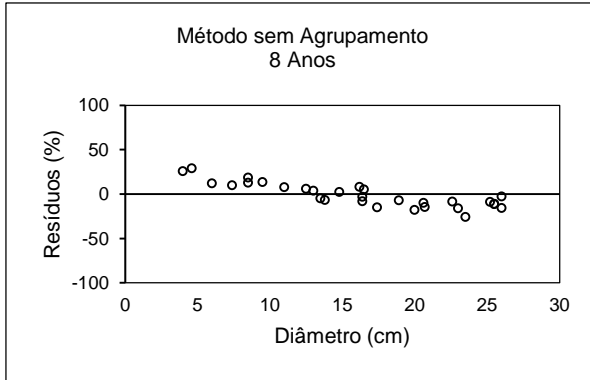
As fortes tendências observadas na dispersão dos resíduos do volume total podem estar relacionadas ao ajuste do polinômio de 5º Grau, visto que esse modelo foi ajustado por meio do método dos mínimos quadrados para estimar a variável d_{id}^1 . Dessa forma, os diâmetros ao longo do fuste da árvore foram estimados com precisão bastante satisfatórias. A variável volume total, por sua vez, foi obtida de forma indireta, a partir da integral desse modelo de afilamento, o que proporcionou resíduos com subestimativas e/ou superestimativas mais evidentes. Outro fator que pode ter prejudicado as estimativas de volume total está relacionado com a pouca quantidade de dados de cubagem em determinadas idades.

Diferente do deste estudo, Queiroz (2006) avaliou as estimativas de volume ao longo do fuste da *Mimosa scabrella*, na região de Curitiba, com os dados estratificados por classe de idade, sendo que, o polinômio de 5º Grau proporcionou o melhor desempenho nas estimativas para as idades mais jovens, de 6 a 9 anos, enquanto o polinômio de Potências Fracionárias e Inteiras tendeu a apresentar melhor resultado nas idades mais avançadas. Yoshitani Junior *et al.* (2012) destacaram que o polinômio de 5º grau e o polinômio de Potências Fracionárias e Inteiras, geralmente, apresentam melhor precisão por serem mais flexíveis para estimar a variação da forma do fuste de *Pinus taeda*, pois seus parâmetros conseguem descrever melhor a extremidade superior e inferior das árvores.

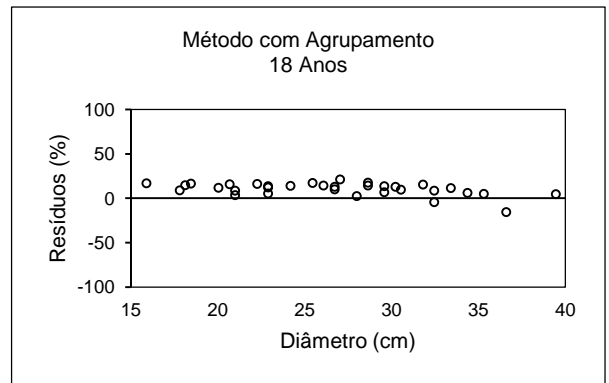
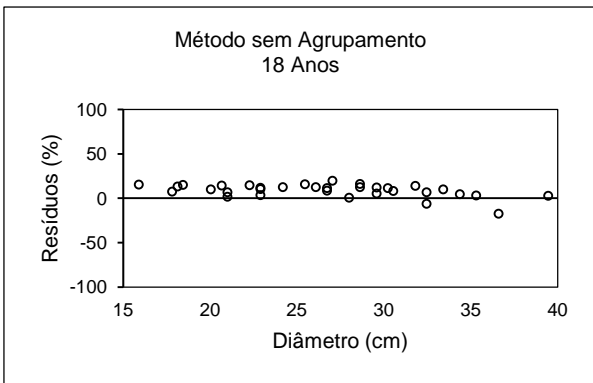
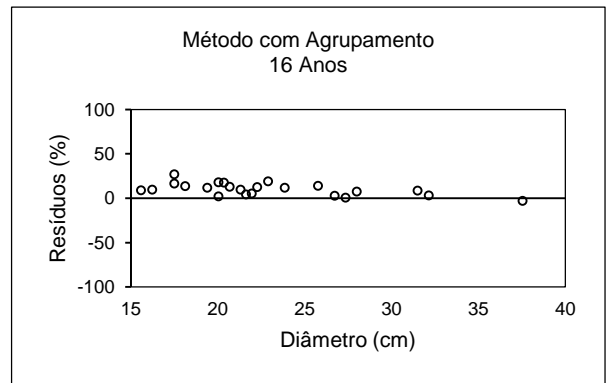
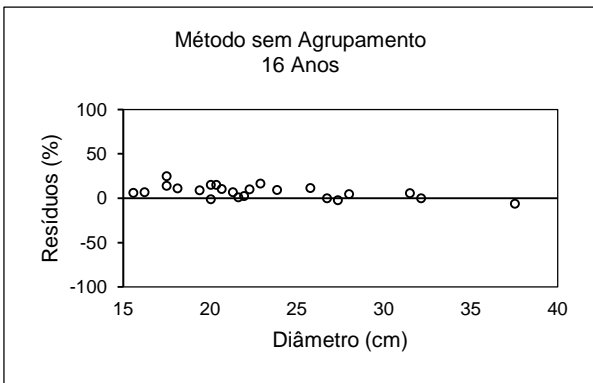
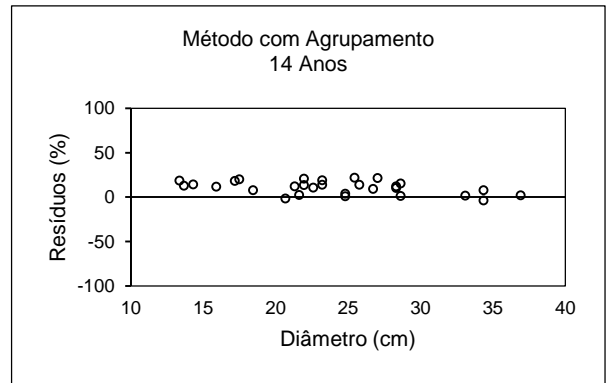
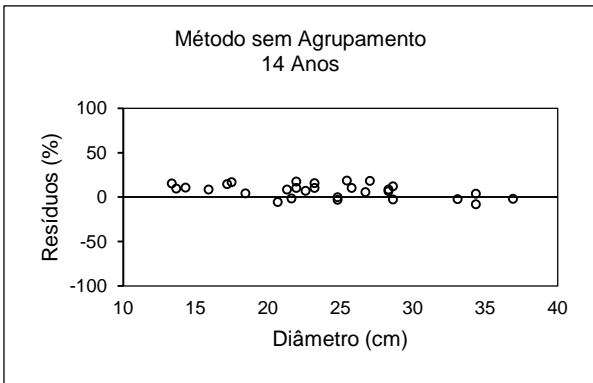
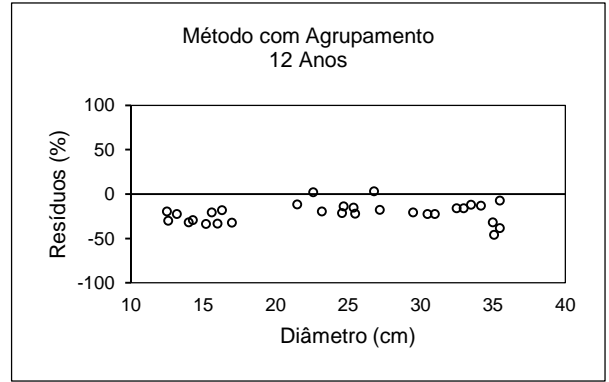
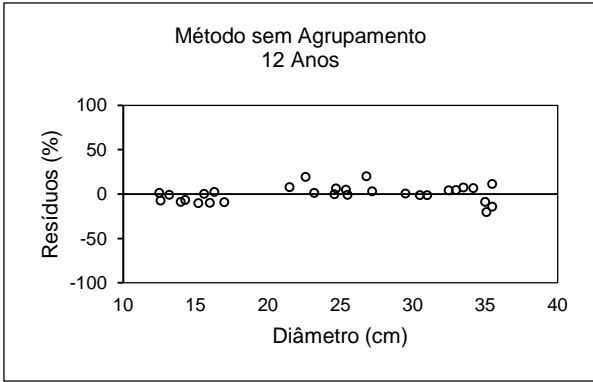
Téo *et al.* (2013) testaram diferentes funções de afilamento para *Pinus elliottii*, na região de Caçador, SC. O polinômio de 2º Grau apresentou os melhores resultados nas idades de 10 e 18 anos, enquanto o polinômio de Potências Fracionárias e Inteiras foi superior aos 27 anos de idade, sendo que, as estatísticas de ajuste e precisão foram próximas das obtidas no presente estudo.



continua...



continua...



continua...

conclusão...

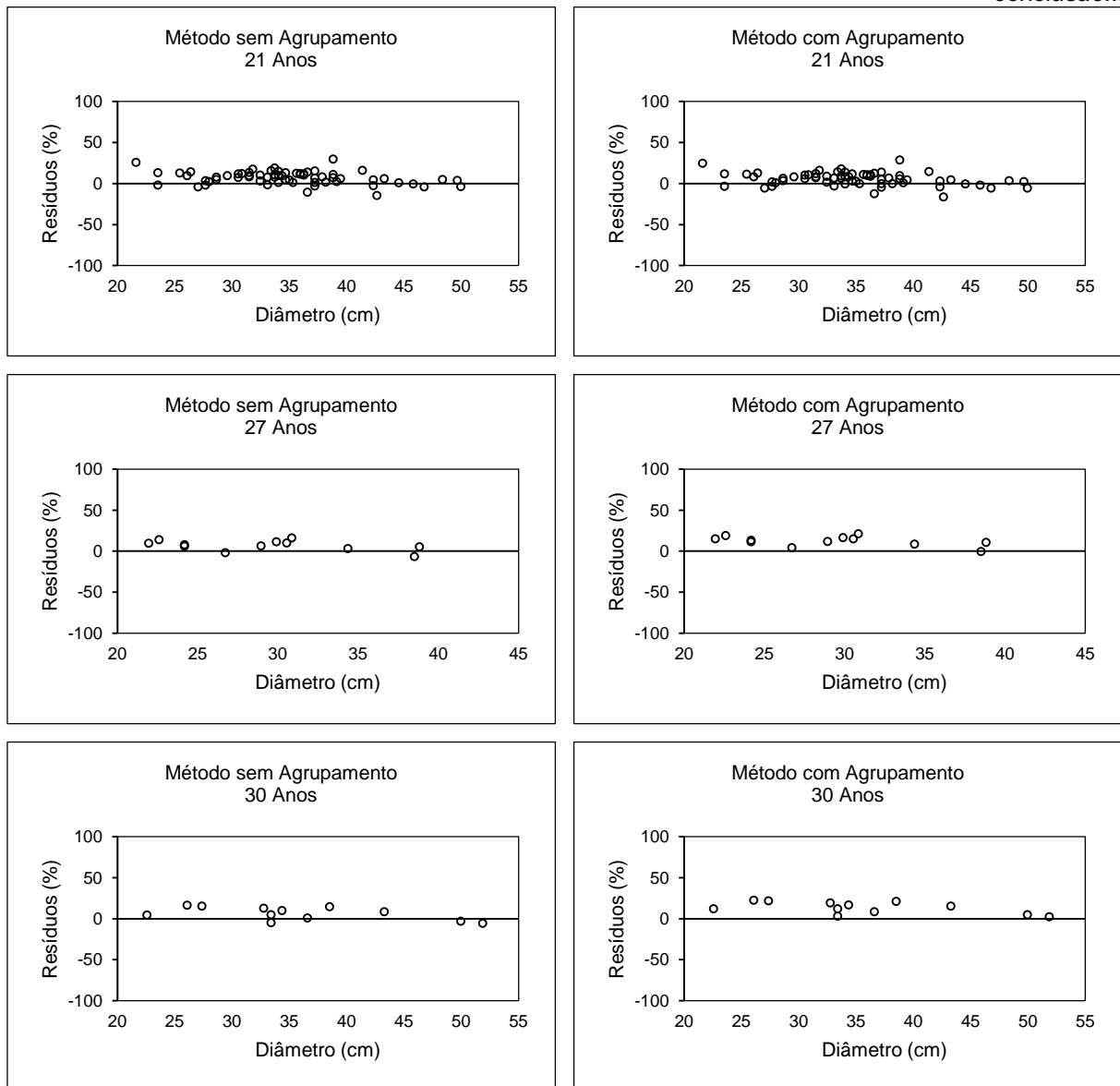


FIGURA 11 – DISPERSÃO DE RESÍDUOS DA FUNÇÃO DE AFILAMENTO TESTADA PARA ESTIMAR O VOLUME TOTAL COM CASCA DE *Pinus* spp., COM E SEM AGRUPAMENTO DOS DADOS, NA REGIÃO DE CAÇADOR, SC

4.2.2. Identidade dos métodos de estimativas

O resultado do teste L&O, proposto por Leite e Oliveira (2002), utilizado para comparar as estimativas dos diâmetros ao longo do fuste e do volume total com casca das árvores de *Pinus* spp., realizadas por meio do método sem agrupamento e com agrupamento dos dados por idade, está disponível na TABELA 9.

TABELA 9 – COMPARAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DE DIÂMETRO E VOLUME TOTAL COM CASCA OBTIDAS DO MÉTODO COM E SEM AGRUPAMENTO DOS DADOS

VARIÁVEL	b_0	b_1	\bar{e}	$R_{y_jy_1}$	$t_{\bar{e}}$	F_{cal}	CONCLUSÃO
Diâmetro	0,5403**	0,9558**	-0,031	0,995	1,64 ^{ns}	949,78**	$Y_j \neq Y_1$
Volume	-0,0067**	1,0065**	0,005	0,998	1,19 ^{ns}	5,00**	$Y_j \neq Y_1$

Em que: ** = significativo para p-valor $\leq 0,01$; ^{ns} = não significativo para p-valor $< 0,01$; \bar{e} erro médio; $R_{y_jy_1}$ = coeficiente de correlação linear; $t_{\bar{e}}$ = teste t do erro médio; F_{cal} = valor do F calculado.

Os coeficientes estimados do modelo de regressão linear simples foram todos significativos, para valor-p $\leq 0,01$, tanto para variável diâmetro quanto para volume individual. No entanto, quando foi comparado o valor de F_{cal} e F_{tab} (diâmetro = 4,60 e volume = 4,65), conforme proposto por Graybill, verificou-se que, simultaneamente, os coeficientes b_0 e b_1 foram estatisticamente diferentes de 0 e 1, não havendo igualdade entre os métodos testados, para p-valor $\leq 0,01$, devido a rejeição da hipótese H_0 .

O erro médio encontrado entre os métodos de estimativas foi bastante baixo e próximo de zero, principalmente para o volume. Quando comparado estatisticamente por meio do teste $t_{\bar{e}}$, o erro médio foi não significativo, para p-valor $\leq 0,01$, para ambas as variáveis, indicando que as diferenças entre os métodos foram aleatórias.

A correlação linear ($R_{y_jy_1}$) entre as estimativas mostrou-se bastante forte e muito próximo de 1. O valor de $(1-|\bar{e}|)$ foi igual a 0,969 e 0,995, para a variável diâmetro e volume, respectivamente, satisfazendo a condição de $R_{y_jy_1} \geq (1-|\bar{e}|)$.

Na FIGURA 12 é possível observar que as estimativas de diâmetro apresentaram grande variação entre os dois métodos, enquanto as estimativas de volume foram semelhantes, devido à pequena dispersão dos valores.

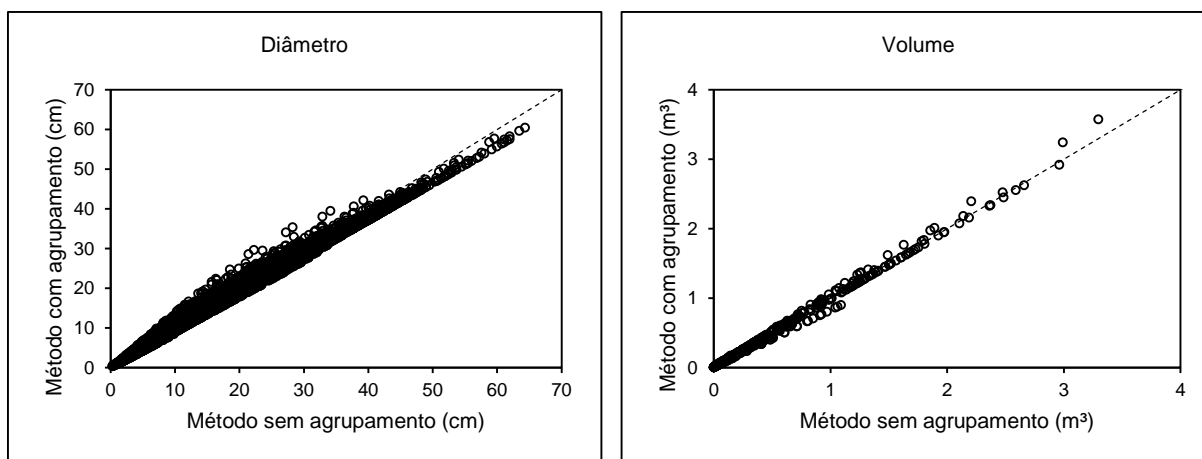


FIGURA 12 – RELAÇÃO LINEAR ENTRE AS ESTIMATIVAS OBTIDAS NO MÉTODO SEM AGRUPAMENTO E NO MÉTODO COM AGRUPAMENTO, PARA AS VARIÁVEIS DIÂMETRO E VOLUME TOTAL COM CASCA DE *Pinus* spp., NA REGIÃO DE CAÇADOR, SC

Os resultados obtidos indicaram que as estimativas de volume provenientes de ambos os métodos testados diferiram estatisticamente entre si. Porém, isso não inviabiliza o uso do modelo geral, ou seja, com agrupamento de dados, pois as diferenças entre os métodos foram muito baixas. Leite e Oliveira (2002) destacaram que a situação encontrada no presente trabalho pode ser aceita, pois quando a soma de quadrados dos resíduos (SQR) é muito pequena, e nesse caso foi 0,7708, o valor do $F(H_0)$ tende a ser elevado, resultando em significância. Os autores ainda ressaltaram que isso ocorre quando os resultados dos dois métodos são muito próximos e qualquer pequena diferença pode levar a significância do teste F.

Portanto, a equação proveniente do método com agrupamento dos dados foi utilizada para fazer os sortimentos de multiprodutos florestais no programa SisPinus® e, dessa forma, foi possível evitar o uso de um modelo de afilamento para cada idade.

4.3. ESTRUTURA DA FLORESTA PRÉ-REGULAÇÃO

A floresta utilizada no presente estudo possui 5.786,75 ha de área de efetivo plantio e encontra-se completamente desregulada, devido à grande quantidade de área plantada em determinadas idades, como pode ser observado na FIGURA 13.

A espécie *Pinus taeda* é predominante na floresta, pois apresentou 4.942,53 ha de área plantada (85,41% da área total) e a sua idade variou de 0 a 32 anos. Por outro lado, a área de *Pinus elliottii* é de apenas 844,22 ha (14,59% da área total) e a sua idade variou de 21 a 33 anos.

As classes de idade de 0 a 12 anos constituíram 80,64% da área plantada, enquanto 11,83% estava contido entre as classes de idade de 29 a 33 anos. Essas informações evidenciaram o elevado grau de desbalanceamento da floresta.

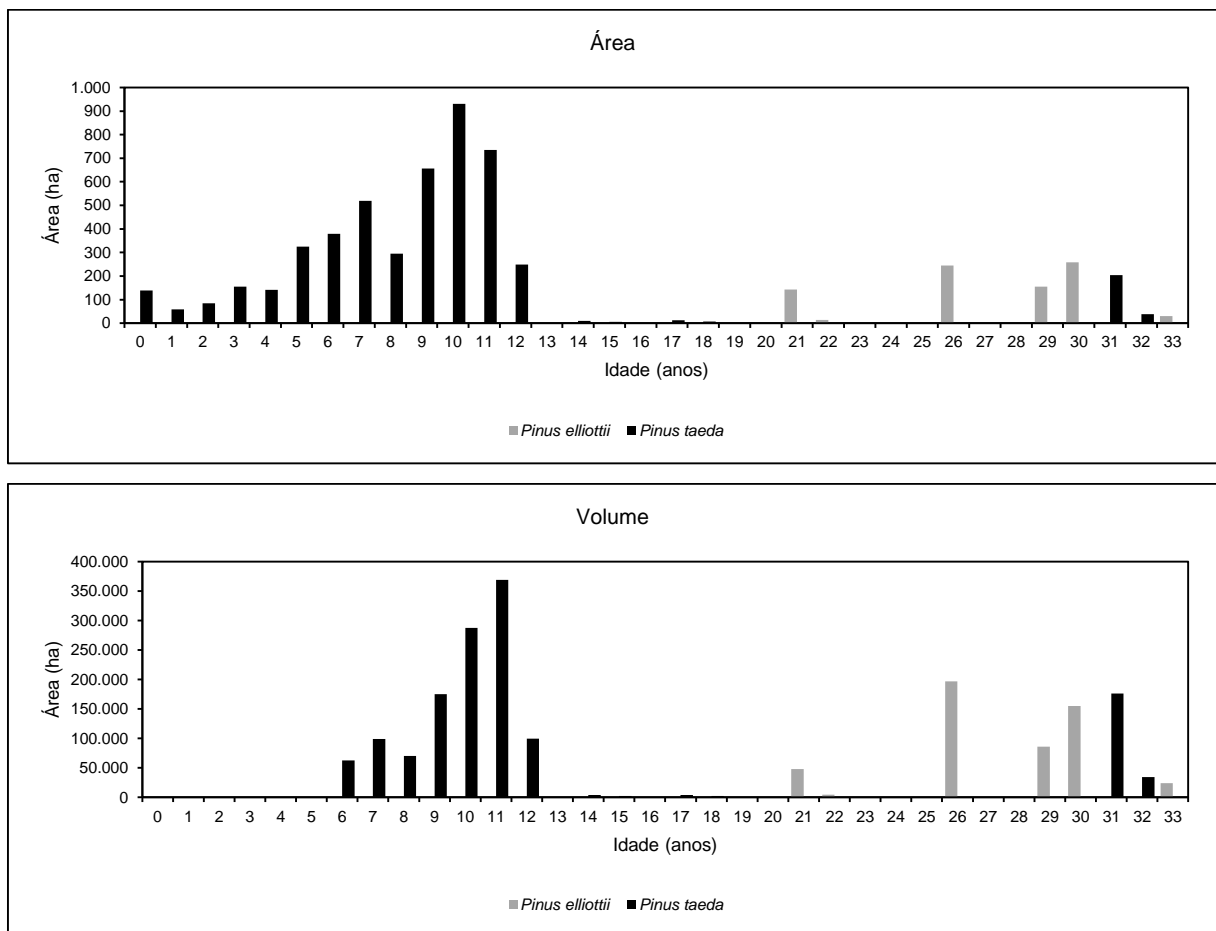


FIGURA 13 – DISTRIBUIÇÃO DA ÁREA DE PLANTIO E DO VOLUME DE *Pinus* spp. POR IDADE

A distribuição volumétrica da floresta apresentou estrutura semelhante ao da área plantada, na qual existe predomínio de volume em algumas idades, mas com baixa quantidade de volume de madeira nas idades intermediárias de 14 a 25 anos. As informações de volume nas classes de idade de 0 e 5 anos não estão disponíveis, pois o inventário florestal ainda não foi iniciado nessas áreas.

4.4. PLANEJAMENTO OTIMIZADO DA FLORESTA

Os modelos de programação linear, propostos no presente estudo, com a finalidade de maximizar a produção dos sortimentos, maximizar o valor presente líquido dos sortimentos, minimizar a oscilação da produção anual máxima e mínima dos sortimentos e minimizar os desvios da produção dos sortimentos em anos subsequentes resultaram em soluções factíveis, ou seja, apresentaram resultados potencialmente viáveis de serem aplicados.

O desempenho das estratégias de otimização utilizadas para regular a estrutura volumétrica dos povoamentos de *Pinus* spp. estão apresentados na TABELA 10. É possível perceber que as funções objetivo apresentaram grande variação quanto ao número de iterações necessárias para encontrar o valor ótimo global, apesar de serem bastante baixos.

TABELA 10 – NÚMERO DE ITERAÇÕES DOS MODELOS DE REGULAÇÃO DOS POVOAMENTOS DE *Pinus* spp., PARA CADA FUNÇÃO OBJETIVO

FUNÇÃO OBJETIVO	NÚMERO DE ITERAÇÕES
Maximização da produção	119
Maximização do VPL	173
Minimização da oscilação	609
Minimização dos desvios	598

A estratégia de otimização que maximizou o valor presente líquido dos povoamentos se destacou, em relação as demais, em virtude da menor quantidade de iterações. Por outro lado, a função que minimizou a oscilação da produção anual máxima e mínima dos sortimentos resultou no maior número de iterações.

Os talhões selecionados para as atividades de desbastes ou de corte raso foram diferentes em cada estratégia de regulação, ao longo do horizonte de planejamento, fazendo com que a condução dos povoamentos florestais fosse realizada de forma distinta em cada cenário proposto.

Dessa forma, a partir dos resultados obtidos neste estudo foi possível afirmar que soluções diferenciadas foram encontradas para um mesmo problema, as quais foram resultantes do tipo de formulação matemática do modelo. Resultado semelhante também foi obtido por Carvalho (2012), o qual avaliou a influência das funções objetivo em modelos de regulação florestal, e encontrou resultados diferentes

para cada modelo formulado, sendo que a utilização de cada um depende dos objetivos do empreendimento em questão. Silva *et al.* (2003b), por sua vez, utilizaram a programação linear para maximizar o Benefício Periódico Equivalente (BPE), mas avaliaram as diversas formas de estimativas da produção florestal, na qual também foram obtidas formas diferenciadas de regulação das florestas.

Na FIGURA 14 é possível observar a porcentagem de área utilizada em cada regime de manejo, ao longo do horizonte de planejamento considerado, e para todas as funções objetivo.

Os talhões da espécie *Pinus elliottii* (PE) já implantados apresentaram uma pequena quantidade de área submetida ao corte raso no primeiro ano do horizonte de planejamento, para função objetivo que minimizou a oscilação da produção anual máxima e mínima dos sortimentos e que minimizou os desvios da produção dos sortimentos em anos subsequentes. Para função objetivo que maximizou o valor presente líquido dos sortimentos, os talhões de PE foram colhidos até no segundo ano. Os talhões de *Pinus taeda* (PT), que também já foram implantadas anteriormente, foram gradualmente cortados e inseridos no manejo padrão.

Os talhões de PE e PT que não foram indicados para corte raso e que apresentaram idades bastante avançadas, ou seja, superior a 27 anos, foram conduzidas no manejo de exceção (ME). Os talhões contidos no ME, por sua vez, foram submetidos ao corte raso em até 12 anos do horizonte de planejamento, mas com uma redução gradual na quantidade de área colhida durante esse período.

Para as funções objetivo de maximização, a partir de 28 anos do horizonte de planejamento todos os talhões foram integralmente submetidos ao manejo padrão (MP), o qual representava a forma de condução ideal da floresta, conforme definido pela própria empresa. Enquanto para as funções objetivo de minimização, o MP foi predominante depois dos 24 anos.

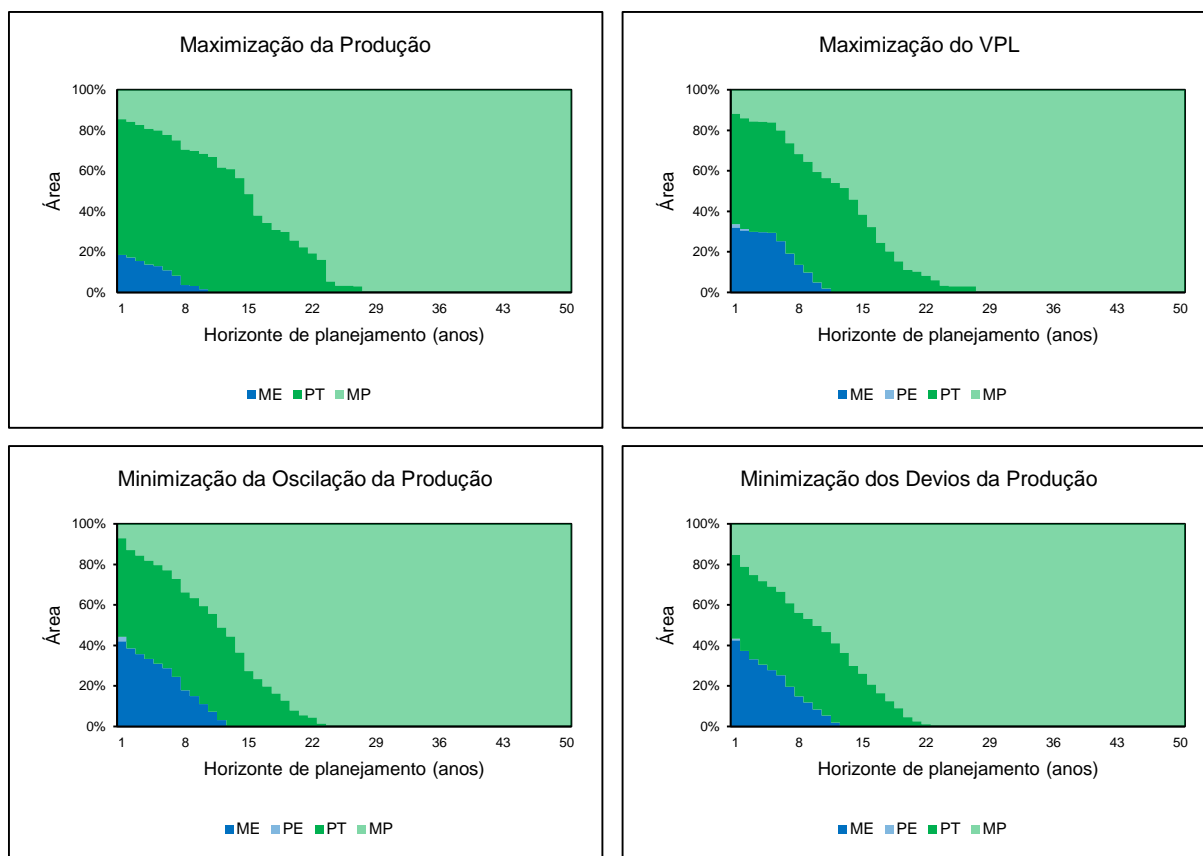


FIGURA 14 – PORCENTAGEM DE ÁREA DOS POVOAMENTOS DE *Pinus spp.* POR REGIME DE MANEJO E PARA CADA FUNÇÃO OBJETIVO

Na TABELA 11 estão disponíveis as informações de área média anual e área total dos talhões de *Pinus spp.*, submetidos nas atividades silviculturais de desbastes e corte raso, para todas as funções objetivo.

TABELA 11 – ÁREA MÉDIA ANUAL E TOTAL DAS ATIVIDADES SILVICULTURAIS PROPOSTAS NOS POVOAMENTOS DE *Pinus spp.*, PARA CADA FUNÇÃO OBJETIVO

FUNÇÃO OBJETIVO	1ºD	2ºD	3ºD	CR
Área média anual (ha)				
Maximização da produção	260,54	229,75	216,78	262,53
Maximização do VPL	241,65	217,76	197,28	237,66
Minimização da oscilação	254,07	218,68	194,23	239,10
Minimização dos desvios	247,71	215,48	195,13	236,20
Área total (ha)				
Maximização da produção	13.026,80	11.487,41	10.838,77	13.126,36
Maximização do VPL	12.082,55	10.888,02	9.864,15	11.882,76
Minimização da oscilação	12.703,66	10.934,19	9.711,28	11.955,07
Minimização dos desvios	12.385,25	10.773,93	9.756,63	11.810,19

Em que: 1ºD = primeiro desbaste; 2ºD = segundo desbaste; 3ºD = terceiro desbaste; CR = corte raso.

As quantidades de áreas envolvidas nas operações de desbastes e do corte raso apresentaram grandes variações entre as estratégias de regulação. O modelo que maximizou a produção dos sortimentos resultou na maior média de áreas submetidas ao primeiro, segundo e terceiro desbaste, bem como no corte raso e, assim, proporcionou a maior área total dessas atividades no final do horizonte de planejamento considerado. No entanto, não foi observado uma tendência de ocorrência de menor média de área submetida as atividades silviculturais entre as demais estratégias de otimização.

A quantidade de áreas, em valores absolutos e porcentagem, submetidas nas atividades silviculturais realizadas nos povoamentos de *Pinus spp.*, ao longo do horizonte de planejamento considerado e para todas as funções objetivo, pode ser observada na FIGURA 15.

Em determinados períodos do horizonte de planejamento, extensas áreas foram selecionadas para o corte raso, as quais corresponderam em mais de 60% das operações silviculturais, como pode ser observado nas idades de 1, 15 e 49 anos para função objetivo que maximizou a produção dos sortimentos, bem como nas idades de 14 e 15 anos para função objetivo que maximizou o valor presente líquido dos sortimentos e que minimizou a oscilação da produção anual máxima e mínima dos sortimentos.

Além disso, em todas as estratégias de otimização, foi possível perceber que há grandes quantidades de áreas submetidas ao primeiro desbaste nos três primeiros anos do horizonte de planejamento. Esse resultado está diretamente relacionado aos desbastes atrasados nos talhões com até doze anos de idade.

Após esses períodos também há uma grande quantidade de área destinada ao segundo e ao terceiro desbaste. Contudo, após esses períodos não se verificou um padrão evidente de ocorrência das atividades silviculturais, mas com maiores oscilações das operações para as duas funções objetivo de maximização. É importante ressaltar que esses resultados podem proporcionar problemas de ordem operacional, devido ao desequilíbrio nas atividades em anos subsequentes.

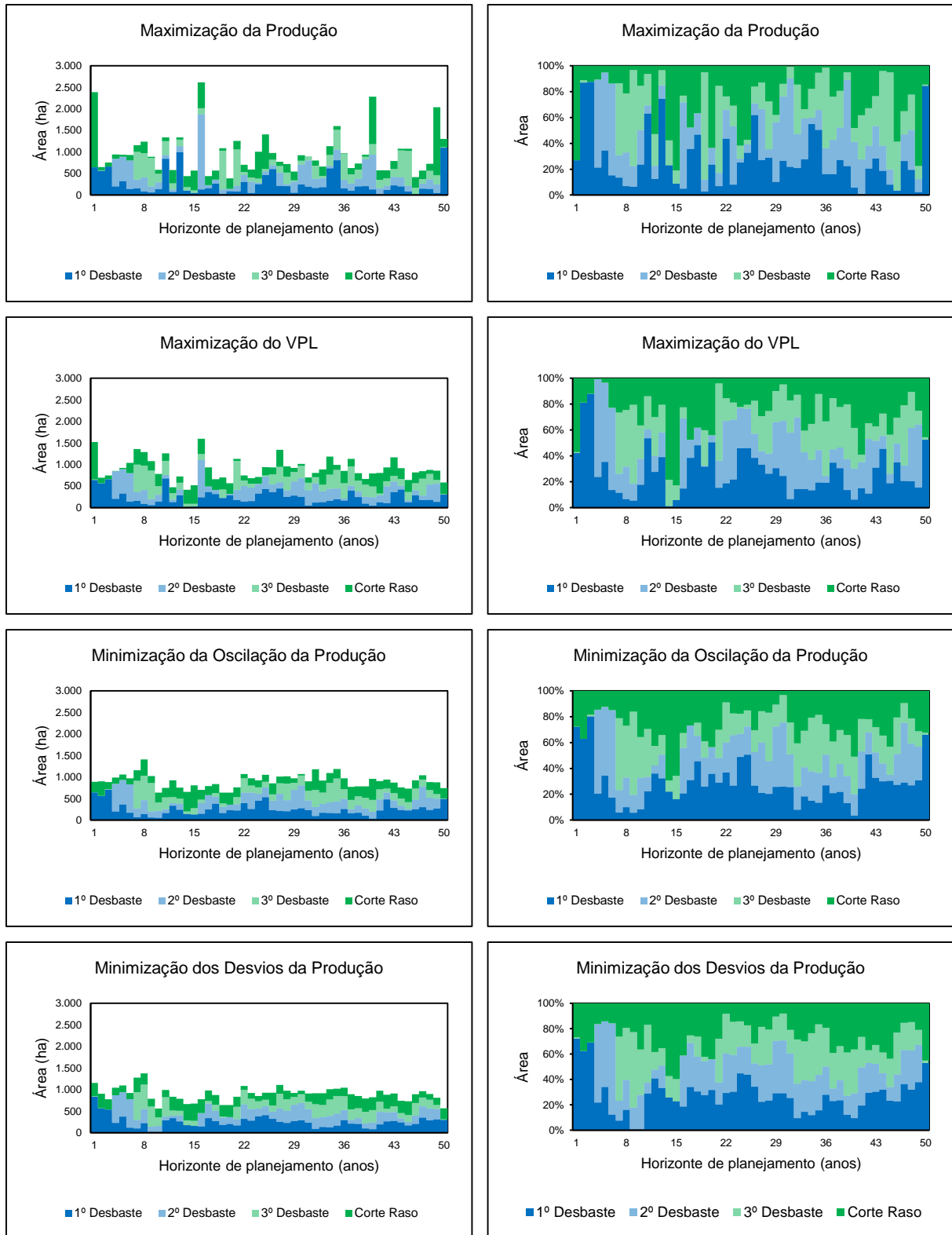


FIGURA 15 – ATIVIDADES SILVICULTURAIS REALIZADAS NOS POVOAMENTOS DE *Pinus* spp., PARA CADA FUNÇÃO OBJETIVO

Na FIGURA 16 pode ser observado o volume total dos sortimentos utilizados para consumo interno e para venda, em valores absolutos e porcentagem, provenientes dos povoamentos de *Pinus* spp., ao longo do horizonte de planejamento considerado e para todas as funções objetivo.

As quatro estratégias de otimização foram capazes de regular a estrutura volumétrica dos povoamentos de *Pinus* spp., proporcionando produções constantes ao longo dos anos e, dessa forma, evitando possíveis déficits dos sortimentos de madeira para consumo interno, o que é fundamental para o planejamento estratégico de uso dessas florestas, bem como para a sustentabilidade do empreendimento.

As duas funções objetivo com finalidade de minimização resultaram em produções volumétricas mais homogêneas, quando comparadas com aquelas de maximização, especialmente nos primeiros anos do horizonte de planejamento.

A função objetivo que minimizou a oscilação da produção anual máxima e mínima dos sortimentos se destacou, em relação as demais, pois proporcionou produções volumétricas constantes em vários anos. Resultado semelhante também foi obtido pela função que minimizou os desvios da produção dos sortimentos, na qual o volume produzido sempre foi muito próximo entre os anos consecutivos. Para estas duas funções objetivo de minimização, o volume máximo anual obtido foi inferior a 300.000 m³ de madeira.

Por outro lado, a função objetivo que maximizou a produção dos sortimentos resultou em produção volumétrica bastante elevada em diversos períodos do horizonte de planejamento, mas com valor superior a 1.000.000 m³ no primeiro ano. Enquanto variações mais baixas foram observadas na função que maximizou os retornos financeiros, em que o valor máximo foi próximo de 600.000 m³, também no primeiro período.

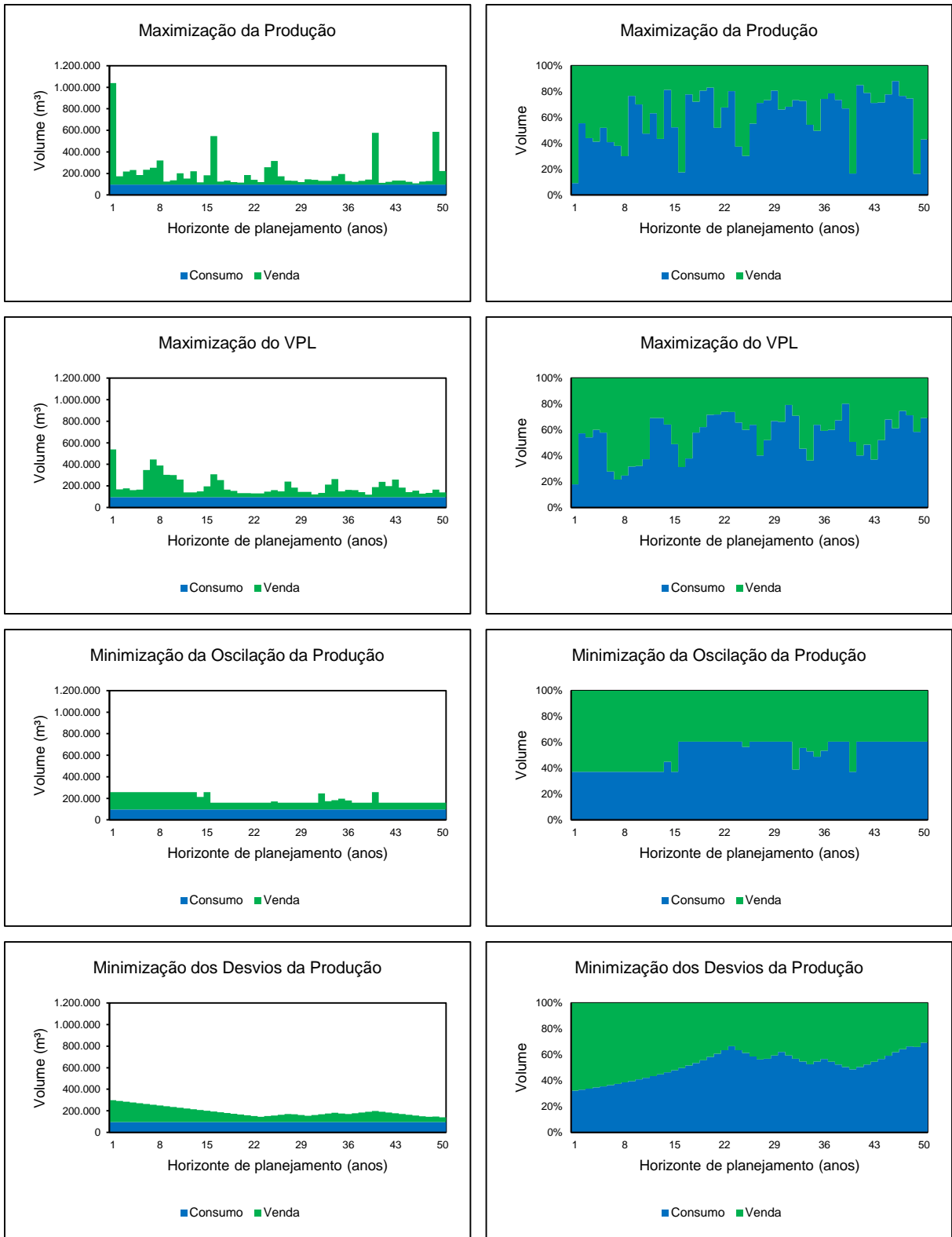


FIGURA 16 – PRODUÇÃO TOTAL DOS POVOAMENTOS DE *Pinus* spp., USADOS NO CONSUMO PRÓPRIO E NA VENDA, PARA CADA FUNÇÃO OBJETIVO

Na FIGURA 17 pode ser observado o volume dos diferentes tipos de sortimentos utilizados para consumo interno na empresa, em valores absolutos e porcentagem, provenientes dos povoamentos de *Pinus* spp., ao longo do horizonte de planejamento considerado e para todas as funções objetivo.

Em todas as estratégias de regulação ocorreu o predomínio no consumo dos produtos serrados, tanto para serraria quanto para serraria especial, mas com pouco uso de matéria-prima laminada, exceto em algumas idades muito específicas.

As funções objetivo de minimização proporcionaram elevado consumo de madeira destinada para serraria até os 13 anos. Posteriormente, ocorreu uma tendência de estabilização no uso desse sortimento, com pouca variação entre os anos subsequentes. Por outro lado, o consumo dos sortimentos foi mais variado entre os anos nas funções objetivo de maximização.

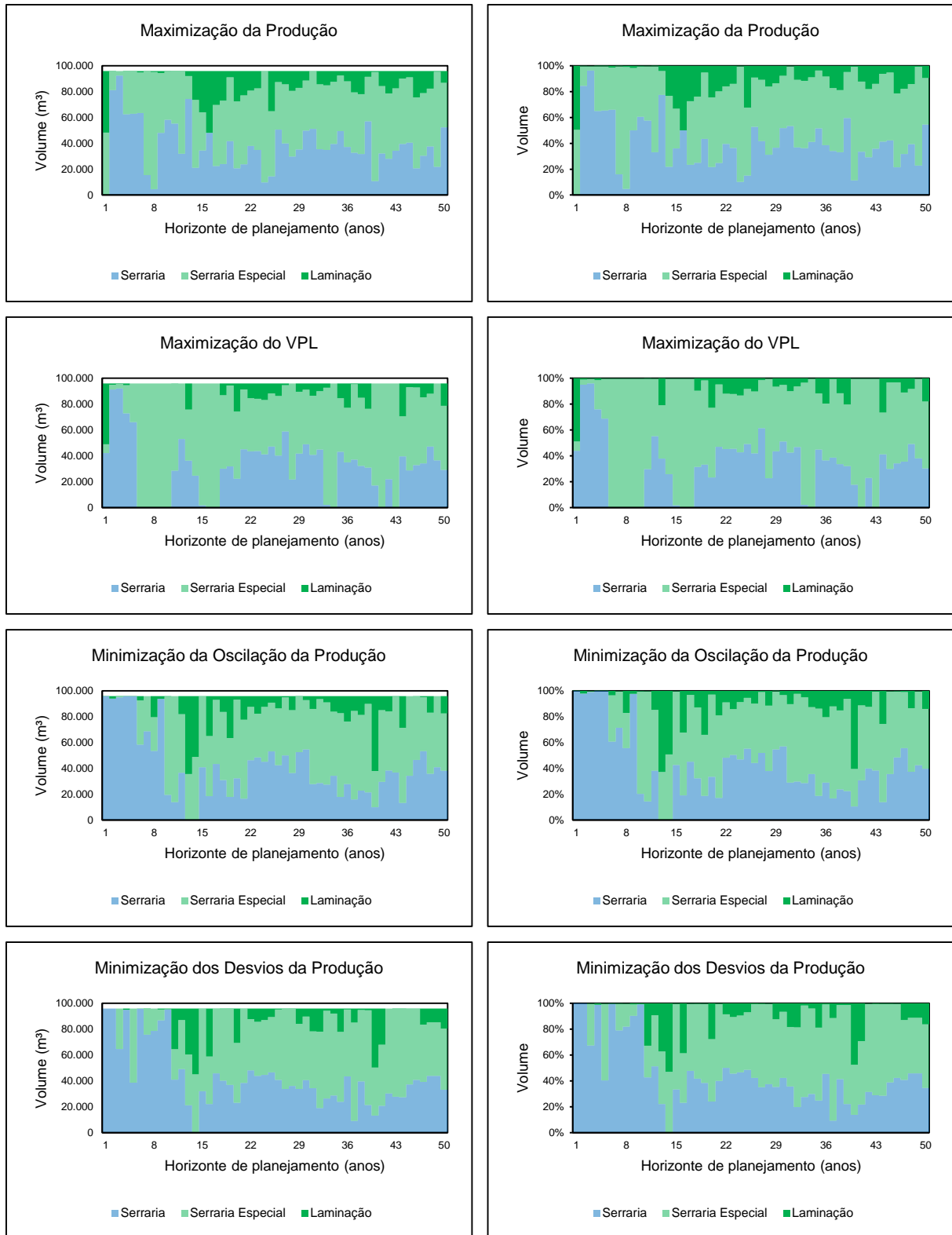


FIGURA 17 – VOLUME DE SORTIMENTOS DOS POVOAMENTOS DE *Pinus* spp., PARA CADA FUNÇÃO OBJETIVO, UTILIZADOS NO CONSUMO PRÓPRIO

Na FIGURA 18 está disponível o volume total dos sortimentos utilizados para venda, em valores absolutos e porcentagem, provenientes dos povoamentos de *Pinus* spp., ao longo do horizonte de planejamento considerado e para todas as funções objetivo.

O volume de madeira para celulose, o qual foi utilizado exclusivamente para venda, foi mais constante ao longo dos anos, quando comparado com os demais sortimentos. Porém, ocorreu em maior quantidade nos primeiros períodos do horizonte de planejamento, devido, principalmente, ao elevado número de áreas submetidas ao primeiro desbaste, como destacado anteriormente. Esse resultado também está relacionado com a evolução, ao longo do tempo, desse tipo de sortimento, visto que, segundo Kohler *et al.* (2015), a madeira destinada para celulose apresenta um volume regular e quase constante durante o crescimento das árvores de *Pinus taeda* nos estados do Paraná e de Santa Catarina e resultando na média de duas toras por árvore durante o período de desenvolvimento do povoamento. Portanto, as diferenças volumétricas desse produto durante o horizonte de planejamento devem-se apenas as quantidades de áreas desbastadas ou colhidas em cada ocasião.

A pequena quantidade de madeira laminada utilizada para consumo interno e para venda se deve à falta de árvores com grandes dimensões nos povoamentos florestais, as quais somente são obtidas em idades mais avançadas. De acordo com Kohler *et al.* (2015), as árvores de *Pinus taeda* apresentaram 30,87% do seu volume para laminação nas classes de idade entre 19 e 22 anos, no estado de Santa Catarina, que, por sua vez, foi inferior ao 62,67% do seu volume destinado para serraria nas mesmas idades.

Nas funções objetivo de maximização, a maior porcentagem dos sortimentos vendidos foi para celulose, enquanto nas funções de minimização essa proporção não foi tão evidente, com os demais sortimentos ocupando grande parte do volume de madeira comercializado. Entretanto, em todos os cenários de otimização foi observado que, em determinados períodos do horizonte de planejamento, somente foram destinados para comercialização os produtos para celulose.

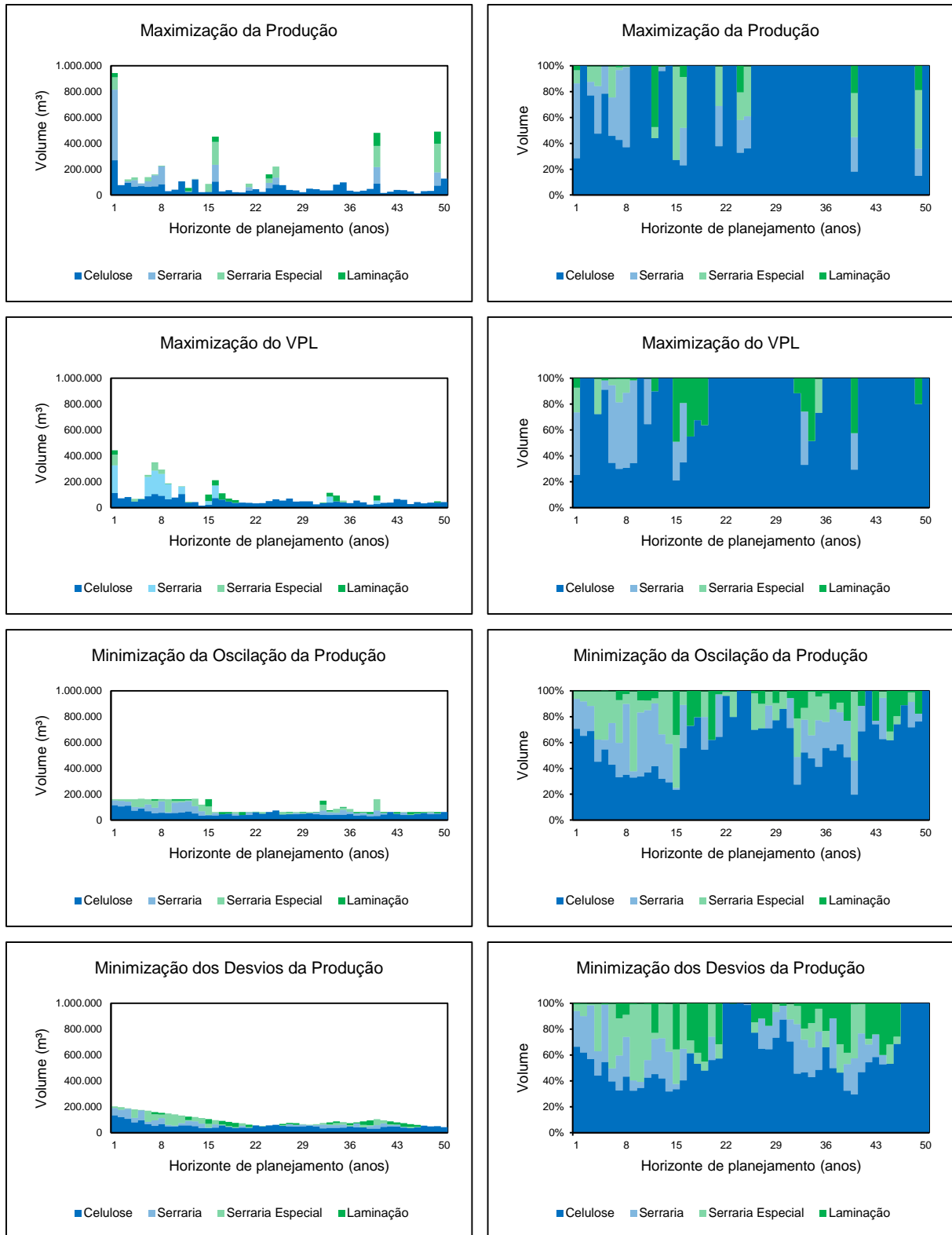


FIGURA 18 – VOLUME DE SORTIMENTOS DOS POVOAMENTOS DE *Pinus* spp., PARA CADA FUNÇÃO OBJETIVO, UTILIZADOS PARA VENDA

As receitas brutas e líquidas e os custos envolvidos nas atividades silviculturais realizadas nos povoamentos de *Pinus* spp., ao longo do horizonte de planejamento considerado e para todas as funções objetivo, podem ser observados na FIGURA 19.

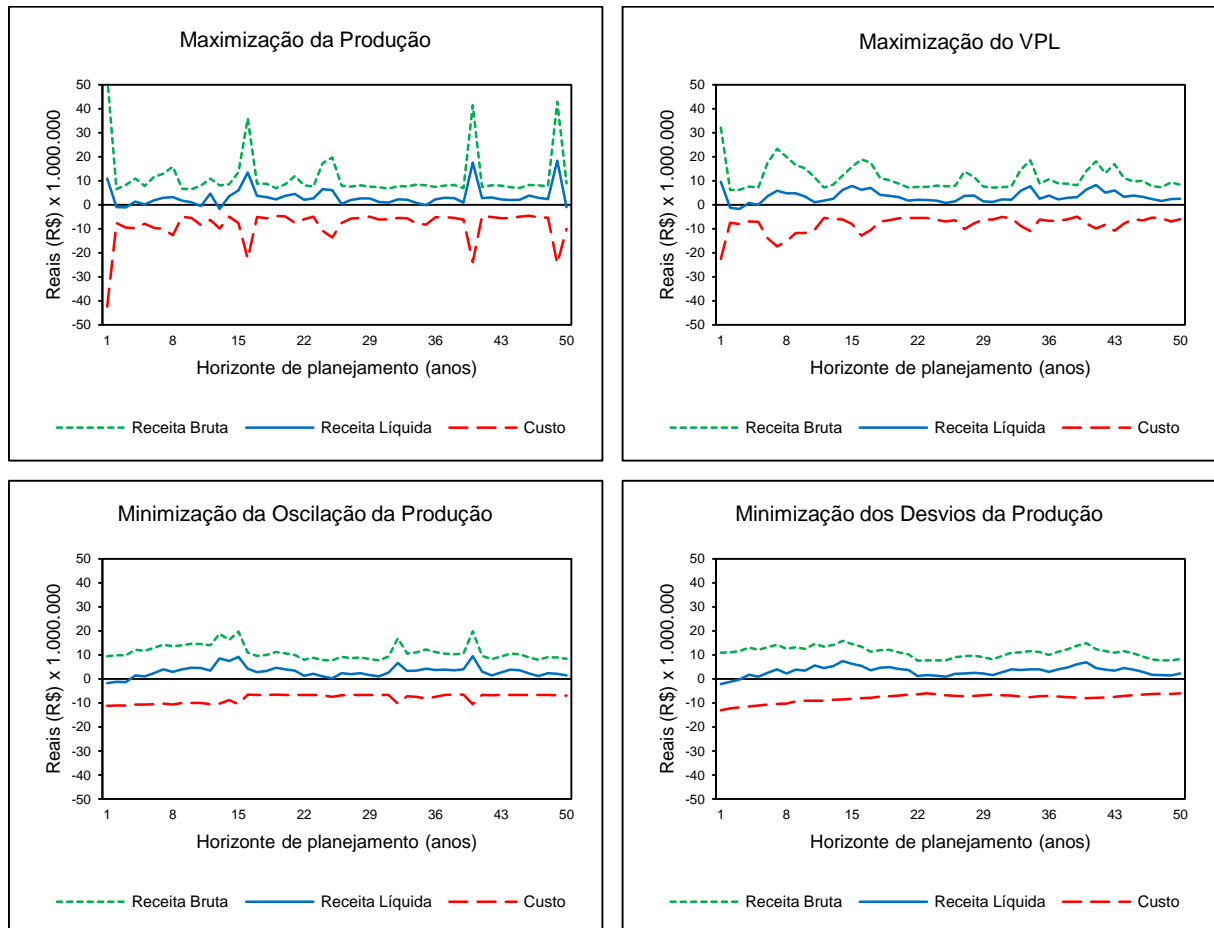


FIGURA 19 – DINÂMICA DO FLUXO DE CAIXA DOS POVOAMENTOS DE *Pinus* spp., PARA CADA FUNÇÃO OBJETIVO

A função objetivo que maximizou a produção florestal apresentou elevados valores de receita bruta e líquida nas idades em que ocorreram maior produção dos sortimentos. O mesmo foi observado na função objetivo que maximizou o valor presente líquido dos sortimentos e que minimizou a oscilação da produção anual máxima e mínima dos sortimentos, mas de forma menos acentuada. Quanto a função objetivo que minimizou os desvios da produção dos sortimentos entre anos consecutivos, os custos e as receitas envolvidas foram muito próximas de constante ao longo do tempo.

Em determinados anos do horizonte de planejamento, foram obtidas receitas líquidas negativas, indicando que as receitas geradas não foram capazes de superar os custos envolvidos naqueles períodos. Esses resultados coincidiram com os períodos em que a quantidade de áreas submetidas ao primeiro desbaste foi bastante elevada. Dessa forma, a produção dos sortimentos, em sua maioria, era destinada para celulose, em decorrência das dimensões das árvores, a qual apresenta baixo valor econômico.

Na TABELA 12 estão apresentados o volume médio anual e total e a receita média anual e total dos sortimentos de madeira, provenientes dos povoamentos de *Pinus* spp., para cada função objetivo.

TABELA 12 – VOLUME MÉDIO ANUAL E TOTAL E RECEITA MÉDIA ANUAL E TOTAL DOS POVOAMENTOS DE *Pinus* spp., PARA CADA FUNÇÃO OBJETIVO

FUNÇÃO OBJETIVO	MÉDIA	TOTAL
Volume do sortimento (m ³)		
Maximização da produção	228.283,91	11.414.195,62
Maximização do VPL	196.935,51	9.846.775,74
Minimização da oscilação	193.389,14	9.669.456,96
Minimização dos desvios	191.933,66	9.596.683,16
Retorno financeiro (R\$)		
Maximização da produção	3.243.660,60	162.183.030,00
Maximização do VPL	3.443.060,84	172.153.042,00
Minimização da oscilação	3.103.844,10	155.192.205,00
Minimização dos desvios	3.212.580,96	160.629.048,00

A função objetivo que maximizou a produção dos povoamentos florestais resultou na maior média e, conseqüentemente, na maior quantidade de volume dos sortimentos, no final do período de planejamento considerado. Por outro lado, o maior retorno financeiro foi obtido a partir da função objetivo que maximizou o valor presente líquido dos talhões. Esses resultados confirmaram que a maior produção volumétrica não necessariamente coincide com o maior retorno econômico.

Ambas as funções objetivo de minimização, apesar de proporcionarem resultados inferiores no retorno financeiro quando comparadas com as de maximização, mostraram-se bastante eficientes para controlar as atividades silviculturais de desbaste e de corte raso, pois resultaram em produções mais homogêneas ao longo do tempo, especialmente nos primeiros anos do horizonte de planejamento.

A aplicação das duas estratégias de otimização que visavam a minimização tornaram-se interessantes para reduzir os problemas operacionais que, possivelmente, poderão ocorrer. Entre as estratégias de otimização que minimizavam o problema, a função objetivo que minimizou os desvios da produção dos sortimentos entre anos consecutivos se destacou, em relação a função objetivo que minimizou a oscilação da produção anual máxima e mínima dos sortimentos, em virtude do maior retorno financeiro.

Para exemplificar o funcionamento do manejo florestal nas estratégias de otimização desenvolvidas nesse estudo, na TABELA 13 estão apresentados os talhões de *Pinus* spp. selecionados para cada atividade silvicultural, mas apenas no primeiro ano do horizonte de planejamento. A função objetivo que maximizou o valor presente líquido dos sortimentos foi selecionada para o exemplo, pois foi a estratégia de regulação que retornou os melhores resultados financeiros.

No primeiro período do horizonte de planejamento, foram utilizados 37 talhões em diferentes atividades silviculturais, sendo 19 talhões submetidos ao primeiro desbaste (1°D), todos com 12 anos de idade, apenas 1 talhão no terceiro desbaste (3°D), com idade de 20 anos, e 27 talhões no corte raso (CR), mas com idades variando de 25 a 35 anos.

Ainda, nem todos os talhões selecionados para primeiro desbaste (1°D), foram integralmente submetidos a essa atividade, na qual, aproximadamente, 16% dos talhões foram parcialmente submetidos ao desbaste. Porém, no terceiro desbaste (3°D), o único talhão selecionado foi todo desbastado. Quanto ao corte raso (CR), cerca de 26% dos talhões não foram integralmente colhidos no primeiro período do horizonte de planejamento.

Na primeira intervenção de desbaste (1°D) foram desbastados 641,11 ha de área, correspondendo à remoção de 148.994,00 m³ de madeira de sortimentos. Porém, no terceiro desbaste (3°D), foram colhidas apenas 11,83 ha de área e 1.386,00 m³ de madeira de sortimentos foram obtidos. Enquanto no corte raso (CR), foram submetidas 866,92 ha de área, totalizando 388.101,00 m³ de sortimentos removidos dos povoamentos de *Pinus* spp.

TABELA 13 – TALHÕES SELECIONADOS PARA ATIVIDADES SILVICULTURAIS NO PRIMEIRO ANO NO HORIZONTE DE PLANEJAMENTO, PARA FUNÇÃO OBJETIVO QUE MAXIMIZOU O VALOR PRESENTE LÍQUIDO DOS POVOAMENTOS DE *Pinus* spp.

TALHÃO	IDADE (anos)	ATIVIDADE	ÁREA TOTAL (ha)	ÁREA UTILIZADA (ha)	VOLUME UTILIZADO (m ³)
Talhão_01	12	1ºD	53,51	53,51	11.849,00
Talhão_02	12	1ºD	20,37	20,37	3.907,00
Talhão_03	12	1ºD	11,08	11,08	1.983,00
Talhão_04	12	1ºD	12,72	12,72	2.075,00
Talhão_05	12	1ºD	16,57	16,57	2.617,00
Talhão_06	12	1ºD	34,64	34,64	7.502,00
Talhão_07	12	1ºD	32,77	32,77	7.036,00
Talhão_08	12	1ºD	34,52	34,52	9.210,00
Talhão_09	12	1ºD	34,69	34,69	9.192,00
Talhão_10	12	1ºD	43,05	43,05	9.377,00
Talhão_11	12	1ºD	40,39	40,39	8.460,00
Talhão_12	12	1ºD	21,75	21,75	5.005,00
Talhão_13	12	1ºD	48,27	48,27	11.397,00
Talhão_14	12	1ºD	22,63	22,63	5.356,00
Talhão_15	12	1ºD	80,72	80,72	19.352,00
Talhão_16	12	1ºD	38,56	36,60	9.837,00
Talhão_16	12	1ºD	38,56	1,95	524,00
Talhão_17	12	1ºD	22,11	22,11	5.986,00
Talhão_18	12	1ºD	56,39	31,34	8.075,00
Talhão_18	12	1ºD	56,39	25,04	6.454,00
Talhão_19	12	1ºD	16,39	16,39	3.800,00
Talhão_20	20	3ºD	11,83	11,83	1.386,00
Talhão_21	30	CR	29,91	3,10	1.458,00
Talhão_22	30	CR	52,97	52,97	23.984,00
Talhão_23	30	CR	33,83	33,83	18.062,00
Talhão_24	30	CR	34,24	34,24	18.007,00
Talhão_25	25	CR	57,99	57,99	13.237,00
Talhão_26	34	CR	35,06	35,06	10.527,00
Talhão_27	34	CR	42,46	42,46	14.902,00
Talhão_28	34	CR	43,63	43,63	14.167,00
Talhão_29	34	CR	124,21	124,21	35.638,00
Talhão_30	34	CR	12,59	12,59	4.572,00
Talhão_31	34	CR	20,47	20,47	5.837,00
Talhão_32	34	CR	48,06	48,06	13.699,00
Talhão_33	34	CR	11,78	11,78	3.163,00
Talhão_34	34	CR	15,03	15,03	4.185,00
Talhão_35	34	CR	8,79	8,79	2.598,00
Talhão_36	34	CR	50,86	14,25	4.361,00
Talhão_36	34	CR	50,86	36,60	11.194,00
Talhão_37	34	CR	30,03	30,03	14.023,00
Talhão_38	35	CR	38,06	38,06	31.541,00
Talhão_39	35	CR	29,67	29,67	18.441,00
Talhão_40	35	CR	19,37	19,37	10.636,00
Talhão_41	35	CR	16,72	16,72	12.637,00
Talhão_42	35	CR	16,52	16,52	10.572,00
Talhão_43	35	CR	20,36	20,36	18.880,00
Talhão_44	35	CR	9,54	2,29	1.891,00
Talhão_44	35	CR	9,54	7,24	5.956,00
Talhão_45	35	CR	16,42	3,34	2.274,00
Talhão_45	35	CR	16,42	13,07	8.892,00
Talhão_46	35	CR	26,74	26,74	17.112,00
Talhão_47	35	CR	48,45	48,45	35.655,00

Em que: 1ºD = primeiro desbaste; 3ºD = terceiro desbaste; CR = corte raso.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nessa pesquisa referentes a classificação de sítio permitem concluir que:

O método da curva-guia e os modelos não lineares testados podem ser utilizados para fazer a classificação dos povoamentos de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* quanto a sua produtividade, pois resultam em estatísticas de ajuste e precisão bastante satisfatórias, exceto para o modelo de Clutter e Jones.

O modelo de Bailey de 4 Parâmetros representa de melhor forma o crescimento em altura dominante das espécies *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* nas diferentes idades.

As curvas de índice de sítio construídas para os povoamentos de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* demonstram padrão anamórfico, confirmando que há forte relação linear entre as variáveis altura dominante e índice de sítio.

Em relação à função de afilamento ajustada foi possível fazer as seguintes conclusões:

O modelo polinomial de 5º Grau proporciona estimativas de volume total com casca tendenciosas para as árvores de *Pinus* spp., quando o ajuste é realizado sem agrupamento e com agrupamento dos dados.

O ajuste do polinômio de 5º Grau considerando todos os dados, ou seja, com agrupamento dos dados, deve ser utilizado para evitar a necessidade de se ajustar um modelo de afilamento por idade, pois os dois métodos testados apresentam resultados semelhantes.

E por fim, quanto ao processo de otimização e regulação dos povoamentos florestais, conclui-se que:

A programação linear é uma ferramenta matemática que proporciona resultados satisfatórios na otimização e regulação da estrutura volumétrica dos povoamentos florestais e deve ser utilizada como uma técnica de auxílio ao planejamento da produção florestal.

As diferentes estratégias de otimização desenvolvidas conseguem regular a estrutura volumétrica dos povoamentos florestais e são capazes de resolver o problema de otimização desenvolvido nesse estudo, independente da sua formulação matemática.

As estratégias de otimização utilizadas conduzem de forma diferenciada as atividades silviculturais de desbastes e corte raso e a escolha de determinado modelo de regulação florestal deve ser realizada com base na preferência do empreendimento florestal.

Os povoamentos florestais devem ser conduzidos conforme o manejo indicado na função objetivo que minimiza os desvios absolutos da produção dos sortimentos entre anos consecutivos, para reduzir os problemas operacionais que podem ocorrer.

A atividade silvicultural de primeiro desbaste tende a reduzir os retornos financeiros provenientes do manejo das florestas, devido aos maiores custos envolvidos e ao baixo valor econômico das classes de sortimentos que se obtém nessas operações.

REFERÊNCIAS

- ASSMANN, E. **Waldetragskunde**. Muenchen: BLV Verlagsgesellschaft, 1961. 435 p.
- ABRAF. **Anuário estatístico da ABRAF 2013 ano base 2012**. Brasília: ABRAF, 2013.
- AGUIAR, A. V.; SOUSA, V. A.; FRITZSONS, E.; JUNIOR, J. E. P. **Programa de melhoramento de pinus da Embrapa Florestas**. Colombo: Embrapa Florestas, 2011.
- ARCE, J. E. **Pesquisa operacional para fins florestais**. Apostila da disciplina de Pesquisa Operacional para Fins Florestais da Pós-Graduação em Ciências Florestais. Curitiba, PR, 2007.
- ARCE J. E. **Um sistema de programação do transporte principal de multiprodutos florestais visando a minimização de custos**. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997.
- BUONGIORNO, J.; GILESS, J. K. **Decision methods for forest resource management**. Washington: Academic Press, 2003. 458 p.
- CAMPOS, B. P. F.; BINOTI, D. H. B.; SILVA, M. L. da; LEITE, H. G.; BINOTI, M. L. M. da S. Conversão de árvores em multiprodutos de madeira utilizando programação linear. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 15, p. 881-887, 2013.
- CARNIERI, C. **Planejamento florestal otimizado via redes de manejo**. 144 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia de Sistemas, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1989.
- CARVALHO, K. H. A. **Influência de variáveis econômicas em modelos de regulação florestal**. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.
- CLUTTER, J. L.; FORTSON, J. C.; PIENAAR, L. V.; BRISTER, G. H.; BAILEY, R. L. **Timber management: a quantitative approach**. New York: John Wiley and Sons, 1983. 333 p.
- DAVID, H. C.; PÉLLICO NETTO, S.; ARCE, J. E.; DALLA CORTE, A. P.; MARINHESKI FILHO, A.; BEHLING, A. Updating of dominant height growth modelling and site index of *Pinus taeda* L., in southern Brazil. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 9, n. 2, p. 115-125, 2015.
- DAVIS, K. P. **Forest management: regulation and valuation**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1966. 519 p.
- DAVIS, L. S.; JOHNSON, K. N. **Forest management**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1987. 790 p.

DRESCHER, R.; SCHNEIDER, P.R.; FINGER, C.A.G. Sortimentos de *Pinus elliottii* Engelm para a região da Serra do Sudeste do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 9, n. 2, p. 55-73, 1999.

FALCÃO, A. O.; BORGES, J. G. Heurísticas para a integração de níveis estratégico e operacional da gestão florestal em problemas de grande dimensão. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 63, p. 94-102, 2003.

FIGUEIREDO FILHO, A.; BORDERS, B.E.; HITCH, K.L. Taper equations for *Pinus taeda* in Southern Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdã, v. 83, n. 1, p. 39-46, 1996.

FRIEDL, R. A. **Dinâmica e prognose da forma dos fustes em povoamentos plantados de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze.** 179 f. Tese (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1989.

GHAEMI, M.; FEIZI-DERAKHSHI, M. Forest optimization algorithm. **Expert Systems with Applications**, v. 41, n. 15, p. 6.676-6.687, 2014.

GOMIDE, L. R. **Planejamento florestal espacial.** 256 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

GOMIDE, L. R.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. Efeito das restrições espaciais de adjacência no planejamento florestal otimizado. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 3, p. 573-584, 2010.

GOMIDE, L. R.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. Comparação entre a meta-heurística simulated annealing e a programação linear inteira no agendamento da colheita florestal com restrições de adjacência. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 2, p. 449-460, 2013.

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

GRAYBILL, F. A. **Theory and application of the linear model.** Massachusetts: Ouxburg Press, 1976. 704p.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional.** 8. Ed. New York: McGraw-Hill, 2006. 850 p.

HOSOKAWA, R. T. Funções de forma e o planejamento da produção florestal. In: SEMINÁRIO SOBRE ATUALIDADES E PERSPECTIVAS FLORESTAIS, 5, 1982, Curitiba. **Anais...**Curitiba: EMBRAPA/CNPQ, 1982. p. 7-14.

HUSCH, B.; BEERS, T. W.; KERSHAW JR., J. A. **Forest mensuration.** 4ª edição, Hoboken, New Jersey, J. Wiley & Sons, 1923, 447 p.

IBÁ. **Industria brasileira de árvores**. Brasília: IBÁ, 2014. Disponível em <http://www.iba.org/images/shared/iba_2014_pt.pdf>. Acesso em julho de 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manuais técnicos em geociências**: Manual técnico de pedologia. n. 4. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2007. 300 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manuais técnicos em geociências**: manual técnico da vegetação brasileira. n. 1. 2 ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. 275 p.

JOHNSON, K. N.; SCHEURMANN, H. L. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives – discussion and synthesis. **Forest Science**, USA, v. 18, n. 1, p. 1-31, 1977.

KOHLER, S. V.; KOEHLER, H. S.; FIGUEIREDO FILHO, A. Modelos de afilamento para *Pinus taeda* por classe de idade. **Floresta e Ambiente**, v. 20, n. 4, p. 470-479, 2013.

KOHLER, S. V.; KOEHLER, 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**, v. 45, n. 3, p. 545-554, 2015.

KURASZ, G. **Sistema de informações geográficas aplicado ao zoneamento ambiental da Reserva Florestal Embrapa/Epagri, Caçador/SC**. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

KRONKA F. J. N.; BERTOLANI F.; PONCE R. H. **A cultura do Pinus no Brasil**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2005. 112 p.

LEUSCHNER, W. A. **Introduction to forest resource management**. New York: John Wiley and Sons, 1984. 304 p.

LEUSCHNER, W. A. **Forest regulation, harvest scheduling and planning techniques**. New York: John Wiley and Sons, 1990. 281 p.

LEITE, H. G.; OLIVEIRA, F. H. T. Statistical procedure to test the identity of analytical methods. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 33, p. 1.105-1.118, 2002.

LIU, G.; HAN, S.; NELSON, J. D.; WANG, H.; WANG, W. Optimization algorithms for spatially constrained forest planning. **Ecological Modelling**, n. 194, p. 421-428, 2005.

LOPES, H. S.; RODRIGUES, L. C. de A.; STEINER, M. T. A. **Meta-heurísticas em pesquisa operacional**. Curitiba: Omnipax, 2013. 484 p.

MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. 2. ed. Guarapuava: UNICENTRO, 2009. 316 p.

MACHADO, S. A.; OLIVEIRA, E. B. de; CARPANEZZI, A. A.; BARTOSZECK, A. C. P. S. Classificação de sítio para bracingais na região metropolitana de Curitiba. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 35, p. 21-37, 1997.

MACHADO, S. A.; SOUZA, R. F. de; JASKIU, E.; CAVALHEIRO, R. Construction of site curves for native *Mimosa scabrella* stands in the metropolitan region of Curitiba. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 4, p. 489-497, 2011.

MEYER, H. A.; RECKNAGEL, A. B.; STEVENSON, D. D.; BARTOO, R. A. **Forest management**. 2 ed. New York: Ronald Press, 1961. 282 p.

MITCHELL, S. A. **Operational forest harvest scheduling optimization – a mathematical model and solution strategy**. 252 f. Thesis. University of Auckland, 2004.

NASCIMENTO, F. A. F. do; DIAS, A. N.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARCE, J. E.; MIRANDA, G. M. Uso da meta-heurística otimização por enxame de partículas no planejamento florestal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 96, p. 557-565, 2012.

OLIVEIRA, E. B. de. **Um sistema computadorizado de prognose do crescimento e produção de *Pinus taeda* L., com critérios quantitativos para a avaliação técnica e econômica de regimes de manejo**. Curitiba, 134 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1995.

OLIVEIRA, E. B. de; OLIVEIRA, Y. M. M. de; AHRENS, S.; MACHADO, S. A. Classificação de sítios para povoamentos de *Pinus elliottii* Engelm. no Sul do Brasil. **Boletim de Pesquisa Florestal**. Colombo, n. 37, p. 5-18, 1998.

PIASSI, L. C. **Métodos de regulação florestal no planejamento da produção de madeira**. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2011.

PUKKALA, T.; HEINONEN, T. Optimizing heuristic search in forest planning. **Nonlinear Analysis: Real World Applications**, v. 7, p. 1.284-1.297, 2006.

QUEIROZ, D.; MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARCE, J. E.; KOEHLER, H. S. Avaliação e validação de funções de afilamento para *Mimosa scabrella* Benth em povoamentos da região metropolitana de Curitiba-PR. **Floresta**, Curitiba, v. 36, n. 2, p. 183-199, 2006.

REBOUÇAS, D. P. O. **Planejamento estratégico – conceitos, metodologias e práticas**. 18 ed. São Paulo: Atlas, 2002. 62 p.

REGAZZI, A. J. Teste para verificar a igualdade de parâmetros e a identidade de modelos de regressão não-linear. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 50, n. 287, p. 9-26, 2003.

REGAZZI, A. J.; SILVA, C. H. O. Testes para verificar a igualdade de parâmetros e a identidade de modelos de regressão não-linear em dados de experimento com

delineamento em blocos casualizados. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 57, n. 3, p. 315-320, 2010.

RODRIGUES, F. L.; SILVA, G. F. da; LEITE, H. G.; XAVIER, A. C.; PEZZOPANE, J. E. M. Um modelo de regulação florestal e suas implicações na formulação e solução de problemas com restrições de recobrimento. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 5 p. 769-778, 2006.

RODRIGUES, F. L. **Metaheurística e sistema de suporte à decisão no gerenciamento de recursos florestais**. 255 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

SANQUETTA, C. R. **Manejo**. 2002. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=257&subject=Manejo&title=Manejo>. Acesso em julho de 2015.

SANTOS, A. L. dos. **Uso da programação linear na identificação de estratégias ótimas de regulação florestal considerando mix de consumo**. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal: modelos de crescimento e produção florestal**. Lavras: FAEPE–UFLA, 2006. 393 p.

SCOLFORO, J. R. S.; MACHADO, S. A. Curvas de índice de sítio para plantações de *Pinus elliottii* nos estados do Paraná e Santa Catarina. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 18, n. 12, p. 140-158, 1988.

SCHNEIDER, P. R. **Manejo florestal: planejamento da produção florestal**. Santa Maria: UFSM, 2008. 501 p.

SCHÖEPFER, W. **Autimatisierung des massen, sorten and wertberechnung stenender waaldbestande schriftenreihe bad**. [S.l.]: Wurttt-Forstl., 1966.

SCHROEDER, J. T.; SCHROEDER, I.; COSTA, R. P. da; SHINODA, C. O custo de capital como taxa mínima de atratividade na avaliação de projetos de investimento. **Revista Gestão Industrial**, Ponta Grossa, v. 1, n. 2, p. 33-42, 2005.

SELLE, G. L.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. Classificação de sítio para *Pinus taeda* L., através da altura dominante, para a região de Cambará do Sul, RS, Brasil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 4, n. 1 p. 77-95, 1994.

SILVA, M. L. da; FONTES, A. A. Discussão sobre os critérios de avaliação econômica: Valor Presente Líquido (VPL), Valor Anual Equivalente (VAE) e Valor Esperado da Terra (VET). **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 931-936, 2005.

SILVA, G. F. da; LEITE, H. G., SILVA, M. L. da; RODRIGUES, F. L.; SANTOS, H. N. Problemas com o uso de programação linear com posterior arredondamento da solução ótima, em regulação florestal. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 677-688, 2003a.

SILVA, G. F. da; LEITE, H. G., SOARES, C. P. B.; SILVA, M. L. da. Influência de estimativa de produção de madeira em processos de regulação florestal utilizando programação linear. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 13, n. 1, p. 57-72, 2003b.

SILVA, G. F. da; SILVA, R. F. da; LEITE, H. G. Aplicação da programação dinâmica na substituição de povoamentos florestais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1.063-1.072, 2007.

SILVA, G. F. da; PIASSI, L. de C.; MORA, R.; MARTINS, L. T.; TEIXEIRA, A. de F.; JUNIOR, A. A. de B. Metaheurística algoritmo genético na solução de modelos de planejamento florestal. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 4, n. 2, p. 160-166, 2009.

SHIMIZU, J. Y. **Pínus na silvicultura brasileira**. Colombo: Embrapa Florestas, 2008. 223 p.

SOUSA, I. F. **Ajuste de modelos não lineares na descrição de germinação de sementes de café (*Coffea arábica* L.) CV. Catuaí**. 74 f. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agropecuária) – Setor de Estatística e Experimentação Agropecuária, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

SOUZA JUNIOR, J. de O. **Análise econômica em plantio de Pinus e Eucalipto no Planalto Serrano Catarinense**. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

STALL, D. **Avaliação econômica e análise de sensibilidade de regimes de manejo em florestas de *Pinus taeda* L. no planalto serrano de Santa Catarina**. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

TAHA, H. A. **Pesquisa operacional**. 8 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. 366 p.

TÉO, S. J.; BRESSAN, D. R.; COSTA, R. H. da. Uso de modelos estatísticos para classificação de sítios em povoamentos de *Pinus taeda* na região de Caçador – SC. **Floresta**, Curitiba, v. 41, n. 1, p. 179-188, 2011.

TÉO, S. J.; MARCON, A.; EHLERS, T.; BIANCHI, J. C.; PELOSO, A.; NAVA, P. R.; COSTA, R. H. DA. Modelos de afilamento para *Pinus elliottii* em diferentes idades, na região de Caçador, SC. **Floresta**, Curitiba, v. 43, n. 3, p. 439-452, 2013.

VASQUES, G. A.; NOGUEIRA, A. S.; KIRCHNER, F. F.; BERGER, R. Uma síntese da contribuição do gênero *Pinus* para o desenvolvimento sustentável no Sul do Brasil. **Floresta**, Curitiba, v. 37, n. 3, 2007.

YOSHITANI JÚNIOR, M.; NAKAJIMA, N. Y.; ARCE, J. E.; MACHADO, S. A.; DRUSZCZ, J. P.; HOSOKAWA, R. T.; MELLO, A. A. Funções de afilamento para plantios desbastados de *Pinus taeda*. **Floresta**, Curitiba, v. 42, n. 1, p. 169-176, 2012.