

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

Karen Janones da Rocha

AFILAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE SORTIMENTOS DE *Tectona grandis* Linn. f. PARA A MAXIMIZAÇÃO DO VOLUME E DA RENDA

Santa Maria, RS
2018

Karen Janones da Rocha

**AFILAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE SORTIMENTOS DE *Tectona grandis* Linn.F. PARA
A MAXIMIZAÇÃO DO VOLUME E DA RENDA**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Engenharia Florestal**.

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Guimarães Finger

Santa Maria, RS
2018

ROCHA, Karen Janones da
AFILAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE SORTIMENTOS DE *Tectona
grandis* Linn.F. PARA A MAXIMIZAÇÃO DO VOLUME E DA RENDA
/ Karen Janones da ROCHA.- 2018.
207 p.; 30 cm

Orientador: César Augusto Guimarães FINGER
Coorientadores: Frederico Dimas FLEIG, Sidney
Fernando CALDEIRA
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2018

1. Forma do fuste 2. Efeito misto 3. Simulação 4.
Programação linear inteira mista I. FINGER, César Augusto
Guimarães II. FLEIG, Frederico Dimas III. CALDEIRA,
Sidney Fernando IV. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Karen Janones da Rocha

**AFILAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE SORTIMENTOS DE *Tectona grandis* Linn.F. PARA
A MAXIMIZAÇÃO DO VOLUME E DA RENDA**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação
em Engenharia Florestal, da Universidade
Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como
requisito parcial para obtenção do título de
Doutor em Engenharia Florestal

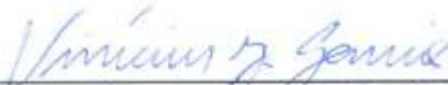
Aprovado em 20 de agosto de 2018:



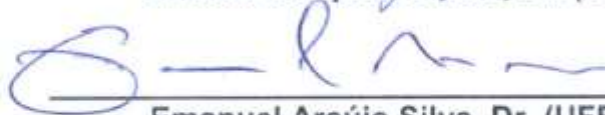
César Augusto Guimarães Finger, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Magda Lea Bolzan Zanora, Dra. (UFSM)



Vinícius Jacques Garcia, Dr. (UFSM)



Emanuel Araújo Silva, Dr. (UFRPE)



Rinaldo Luiz Caraciolo Ferreira, Dr. (UFRPE)

Santa Maria, RS
2018

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Clovis e Carmem
À minha irmã, Giovana

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. César Augusto Guimarães Finger, pela confiança, pela orientação, pela infinita disponibilidade, por todos os ensinamentos e pela oportunidade de trabalhar ao seu lado.

À banca examinadora composta pelos professores e doutores Magda Lea Bolzan Zanon, Vinícius Jacques Garcia, Emanuel Araújo Silva e Rinaldo Luiz Caraciolo Ferreira, pelas valorosas contribuições.

Aos professores do comitê de orientação Sidney Fernando Caldeira e Frederico Dimas Fleig por serem tão receptivos para esclarecer minhas dúvidas e me incentivar.

À CAPES pelo apoio financeiro para a realização desse trabalho.

À professora e amiga Kenia Michele de Quadros Tronco, por toda paciência e carinho, sempre esteve presente para me ajudar ou simplesmente me ouvir. Aos amigos Patrícia F. Miranda, Dério G. Bresciani, Marlene Schulz, Simone M. C. Sabai e Patrícia C. A. Pereira, pelas longas terapias em grupo!

À Universidade Federal de Rondônia por tornar possível o afastamento pelo Programa de Qualificação Docente.

Às amigas que o doutorado me proporcionou e que ficarão para posteridade, Lorena E. da S. Gama, Victor Carlos D. Neto, Anna Paula L. Zimmermann, Carline Welter, Karina Lanzarin, Lorena O. Barbosa, Jairo L. Z. Peripoili, Iyanassô Santos, Jéssica Berté, Mariana Borchert e José Luiz Cechella. Todos aqueles que me ajudaram direta ou indiretamente nessa etapa.

Ao professor, engenheiro florestal, amigo, namorado e companheiro Cyro Matheus Cometti Favalessa, que continua me incentivando e apoiando. Obrigada por cuidar de mim e ser sempre meu porto seguro. Te amo.

RESUMO

AFILAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE SORTIMENTOS DE *Tectona grandis* Linn.f. PARA A MAXIMIZAÇÃO DO VOLUME E DA RENDA

AUTOR: Karen Janones da Rocha

ORIENTADOR: Dr. César Augusto Guimarães Finger

O trabalho foi realizado com o objetivo de descrever a forma do tronco e avaliar a receita dos sortimentos de árvores oriundas de plantios de *Tectona grandis* L.f. localizadas na região centro-sul do estado do Mato Grosso, e desenvolver um simulador para fornecer ao produtor florestal informações técnicas e econômicas adequadas ao planejamento do povoamento. A base de dados foi composta por árvores de *T. grandis* cubadas por diferentes procedimentos e posições de medição, divididas em dez classes de diâmetro à altura do peito (DAP). De forma aleatória, aproximadamente 20 árvores por classe de DAP compuseram a base de dados do ajuste, perfazendo um total de 148 árvores. Modelos não-segmentados, segmentados e de forma variável foram ajustados e a acuracidade das equações foi avaliada pela análise gráfica dos resíduos, coeficiente de determinação ajustado, erro padrão da estimativa em percentagem e análise gráfica dos perfis médios. A melhor equação foi submetida às estratificações por classes de DAP, de fator de forma artificial e de parâmetro de forma "r", e modificações com base no estudo dos pontos de mudança de forma das árvores. Foi aplicada a modelagem mista na equação selecionada testando os efeitos aleatórios para classe de DAP e para as árvores. Na elaboração da tabela de sortimento foram definidas classes de DAP com os centros de classe de 10 a 60 cm e intervalos de 2 cm. O Sistema de Análise, Simulação e Otimização do Sortimento Florestal foi desenvolvido com a Programação Linear Inteira Mista com dois módulos principais, Módulo de Traçamento das Toras e Módulo de Otimização do Sortimento, e um módulo complementar com a finalidade de estimar parâmetros dendrométricos, gerenciar o intercâmbio de informações e apresentar os resultados. Os cenários foram construídos com a finalidade de simular a otimização de sortimentos para dados provenientes da distribuição de diâmetros para três ocorrências de desbastes e para três diferentes sítios. Com a equação de Schöepfer foram determinados três pontos de mudança da forma de fuste de *T. grandis* em diferentes posições, em relação ao estabelecido no modelo de Clark III et al. A equação de Clark III et al. é a mais adequada para estimar os diâmetros ao longo do tronco para a espécie e o ajuste com efeito misto aumenta a flexibilidade do modelo, sendo que este é mais preciso em relação à árvore do que em relação à classe diamétrica. A equação de Clark III et al. com efeito misto é acurada para estimar o perfil, principalmente, nas extremidades dos troncos, e a integral da função permite estimar o volume do tronco e do seu sortimento. As funções auxiliares desenvolvidas para operacionalizar o sistema de otimização de sortimento possibilitam tanto a entrada de dados como o próprio sortimento a partir de dados de árvore individual, de classes de diâmetro e ainda do povoamento. O sistema de otimização de sortimento de *T. grandis* para maximização do volume e da receita permite avaliar diversos cenários para o planejamento técnico e econômico da produção florestal na região centro-sul de Mato Grosso.

Palavras-chave: Forma do fuste. Efeito misto. Simulação. Programação linear inteira mista.

ABSTRACT

TAPER AND OPTIMIZATION OF *Tectona grandis* L.F. ASSORTMENTS FOR THE MAXIMIZATION OF VOLUME AND INCOME

AUTHOR: Karen Janones da Rocha
ADVISOR: Dr. César Augusto Guimarães Finger

The study was conducted in order to describe the shape of bole and evaluate the income from assortments of trees coming from *Tectona grandis* L.f plantations located in the central-south region of Mato Grosso state, and to develop a simulator to provide the forest producer technical and economic information to the appropriate planning of forest stand. The database consisted of *T. grandis* trees divided into ten classes of diameter at breast height (DBH) covered by different procedures and measurement positions. Randomly approximately 20 trees per DBH class comprised the setting database, making a total of 148 trees. Non-segmented, segmented and variable models were adjusted and the accuracy of the equations was evaluated by graphical analysis of the residuals, adjusted coefficient of determination, standard error of the estimate in percentage and graphical analysis of the average profiles. The best equation was submitted to stratifications of DBH, artificial form factor and "r" shape parameters, and modifications based on the study of the shape change points of the trees. Mixed modeling was applied to the selected equation, testing random effects for DBH class and for trees. DBH classes were defined with class centers of 10 to 60 cm and intervals of 2 cm for the elaboration of the assortment table. The Forest Assortment Analysis, Simulation and Optimization System was developed with Mixed Integer Linear Programming with two main modules, Log Trace Module and Assortment Optimization Module, and a complementary module for the purpose of estimating dendrometric parameters, managing the exchanging information and presenting the results. The scenarios were constructed in the order to simulate the assortment optimization for data from the diameters distribution for three occurrences of thinning and for three different sites. With the Schöepfer equation, three points of change of the *T. grandis* bole were determined in different positions when compared to that established in the model of Clark III et al. The equation of Clark III et al. is the most adequate to estimate the diameters along the trunk for the species and the adjustment with mixed effect increases the flexibility of the model, and this is more accurate in relation to the tree than in relation to the DBH class. The equation of Clark III et al. with mixed effect is accurate to estimate the profile, especially at the ends of the trunks, and the integral of the function allows estimating the trunk volume and its assortment. The auxiliary functions developed to operate the assortment optimization system enable both data entry and assortment from individual tree data, DBH classes and even stocking. The *T. grandis* assortment optimization system for volume and income maximization allows the evaluation of several scenarios for the technical and economic planning of forest production in the south-central region of Mato Grosso.

Key-words: Bole form. Mixed effect. Simulation. Mixed integer linear programming.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Etapas para o estudo do afilamento e desenvolvimento de um sistema de análise, simulação e otimização do sortimento de <i>Tectona grandis</i> L.f.....	54
Figura 2 –	Representação gráfica dos parâmetros do modelo econômico e as variáveis do modelo físico para seccionamento e determinação dos respectivos volumes.....	55
Figura 3 –	Localização dos povoamentos de <i>Tectona grandis</i> L.f. utilizados para estudo da forma do tronco e avaliação da renda dos sortimentos, região centro-sul, estado do Mato Grosso, 2018.....	57
Figura 4 –	Distribuição diamétrica da base de dados e frequência amostrada (linha vermelha tracejada) para o ajuste dos modelos de afilamento para <i>Tectona grandis</i> L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso.....	60
Figura 5 –	Classificação de sítio proposta por Favalessa [2018] com o modelo monomolecular e recálculo do β_0 por sítio, idade de referência 12 anos, <i>Tectona grandis</i> L.f., centro-sul do estado de Mato Grosso, 2018.....	79
Figura 6 –	Fluxograma do sistema de análise, simulação e otimização do sortimento florestal desenvolvido para <i>Tectona grandis</i> L.f., centro-sul do estado de Mato Grosso, 2018.....	85
Figura 7 –	Derivadas da função de Schöepfer (1966) - 5° grau - para identificar os pontos de mudança de forma (PMF) do fuste de <i>Tectona grandis</i> L.f., 2018.....	100
Figura 8 –	Distribuição dos resíduos em função dos diâmetros estimados ao longo do fuste (di) e em função da relação altura na posição i pela altura (hi/h) para os modelos de Clark III et al. (1991), Kozak (1988) modificado e Kozak (b) (2004) modificado sem estratificação dos dados para <i>Tectona grandis</i> L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso.....	105
Figura 9 –	Estratificação da variável parâmetro “r” em função do diâmetro à altura do peito para os dados de <i>Tectona grandis</i> L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso.....	108
Figura 10 –	Estratificação da variável fator de forma artificial em função do diâmetro à altura do peito para os dados de <i>Tectona grandis</i> L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso.....	108
Figura 11 –	Estatística do critério de informação Bayesiano de Schwarz para o ajuste do modelo de Clark III et al. (1991) com a combinação de efeitos fixos e um efeito aleatório e para a combinação de efeitos fixos e dois efeitos aleatórios, em nível de classe de diâmetro (DAP) e em nível de árvore, <i>Tectona grandis</i> L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso, 2018.....	111
Figura 12 –	Comportamento do erro padrão da estimativa em percentagem ($S_{yx}\%$) no ajuste do modelo de Clark III et al. (1991) com efeito misto para as diferentes posições de calibração dos efeitos aleatórios, <i>Tectona grandis</i> L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso, 2018.....	112

Figura 13 –	Perfis médios reais e estimados pelas equações de Clark III et al. (1991) original, somente com os coeficientes fixos e com os coeficientes fixos e aleatórios sem estratificação dos dados para <i>Tectona grandis</i> L.f, região centro-sul do estado de Mato Grosso, 2018.....	114
Figura 14 –	Representação gráfica dos diâmetros ao longo dos fustes para três árvores finas, com diâmetro a altura do peito (DAP) entre 10 e 26,9 cm, selecionadas aleatoriamente, dos dados de ajuste para o modelo de Clark III et al. (1991) original e para o modelo de Clark et al. (1991) somente com os coeficientes fixos e com os coeficientes fixos e aleatórios para <i>Tectona grandis</i> L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso, 2018.....	115
Figura 15 –	Representação gráfica dos diâmetros ao longo dos fustes para três árvores médias, com diâmetro a altura do peito (DAP) entre 27 e 42,9 cm, selecionadas aleatoriamente, dos dados de ajuste para o modelo de Clark III et al. (1991) original e para o modelo de Clark et al. (1991) somente com os coeficientes fixos e com os coeficientes fixos e aleatórios para <i>Tectona grandis</i> L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso, 2018.....	116
Figura 16 –	Representação gráfica dos diâmetros ao longo dos fustes para três árvores grossas, com diâmetro a altura do peito (DAP) entre 43 e 60 cm, selecionadas aleatoriamente, dos dados de ajuste para o modelo de Clark III et al. (1991) original e para o modelo de Clark et al. (1991) somente com os coeficientes fixos e com os coeficientes fixos e aleatórios para <i>Tectona grandis</i> L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso, 2018.....	116
Figura 17 –	Distribuição dos resíduos em função dos diâmetros estimados ao longo do fuste para a equação de Clark et al. (1991), com efeito misto, aplicada a uma base distinta da utilizada para o ajuste, <i>Tectona grandis</i> L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso, 2018.....	117
Figura 18 –	Resíduo da estimativa do volume total pela integral do modelo de Clark III et al. (1991) em função do volume total estimado para os dados de <i>Tectona grandis</i> L.f. sem estratificação, região centro-sul do estado de Mato Grosso, 2018.....	118
Figura 19 –	Resíduo da estimativa da altura pela equação genérica 2: $h = \beta_0 + \beta_1 * \ln d + \beta_2 * h_{100}^2$ em função altura estimada e da primeira variável independente para os dados de <i>Tectona grandis</i> L.f. sem estratificação, considerando um sítio intermediário ($h_{100} = 21$ m), Mato Grosso, 2018.....	120
Figura 20 –	Curvas de relação hipsométrica estimadas pela equação genérica 2: $h = \beta_0 + \beta_1 * \ln d + \beta_2 * h_{100}^2$ em função do diâmetro à altura do peito para os dados de <i>Tectona grandis</i> L.f. sem estratificação, considerando um sítio intermediário ($h_{100} = 21$ m), Mato Grosso, 2018.....	121
Figura 21 –	Resíduo da estimativa do diâmetro à 0,1 m de altura pela equação de Schumacher em função variável dependente e independente para os dados de <i>Tectona grandis</i> L.f. sem estratificação, Mato Grosso, 2018.....	123

Figura 22 –	Resíduo da estimativa do diâmetro à 2 m de altura pelo modelo de Husch em função variável dependente e independente para os dados de <i>Tectona grandis</i> L.f. sem estratificação, região centro-sul do estado de Mato Grosso, 2018.....	124
Figura 23 –	Resíduo da estimativa do diâmetro à 5,3 m de altura pelo modelo genérico 7: $\ln(d_{5,3}) = \beta_0 + \beta_1 * k^3 + \beta_2 * \ln(d^2h)$ em função variável dependente e independente para os dados de <i>Tectona grandis</i> L.f. sem estratificação, região centro-sul do estado de Mato Grosso, 2018.....	126
Figura 24 –	Página inicial de cadastro dos dados do simulador desenvolvido para otimização de sortimentos de <i>Tectona grandis</i> L.f. na região centro-sul do estado de Mato Grosso.....	130
Figura 25 –	Página de seleção dos critérios do simulador com dados de entrada provenientes de inventário florestal para otimização de sortimentos de <i>Tectona grandis</i> L.f.....	131
Figura 26 –	Página de seleção dos critérios do simulador com dados de entrada da distribuição de diâmetros para otimização de sortimentos de <i>Tectona grandis</i> L.f.....	134
Figura 27 –	Relatório da otimização dos sortimentos de <i>Tectona grandis</i> L.f. gerado por árvore para maximização da renda.....	135
Figura 28 –	Maximização da receita e do volume dos sortimentos da árvore central na ocasião de desbastes para o sitio de 21 metros, para <i>Tectona grandis</i> L.f. pelo modelo de Clark III et al. (1991), com efeito misto, região centro-sul do estado de Mato Grosso.....	145
Figura 29 –	Maximização da receita e do volume dos sortimentos para <i>Tectona grandis</i> L.f. pelo modelo de Clark III et al. (1991), com efeito misto, simulando corte raso aos 16 anos para os sítios de 17, 21 e 25 metros, região centro-sul do estado de Mato Grosso.....	147

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Resumo das informações povoamentos de <i>Tectona grandis</i> L.f. utilizados para estudo da forma do tronco e avaliação da renda dos sortimentos, região centro-sul, estado do Mato Grosso, 2018.....	56
Tabela 2 –	Frequência das árvores de <i>Tectona grandis</i> L.f. cubadas em diferentes classes de diâmetro, região centro-sul do estado de Mato Grosso, MT.....	59
Tabela 3 –	Análise descritiva das 148 árvores que compõem a base de dados do ajuste de funções de afilamento para <i>Tectona grandis</i> L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso.....	60
Tabela 4 –	Funções de afilamento não segmentadas, segmentadas e de forma variável utilizadas para o ajuste de dados de <i>Tectona grandis</i> L.f., em região centro-sul do estado de Mato Grosso.....	63
Tabela 5 –	Estratificações propostas por classe de diâmetro à altura do peito, por classe de parâmetro “r” e por classe de fator de forma artificial para as árvores de <i>Tectona grandis</i> L.f. cubadas na região centro-sul do estado de Mato Grosso, MT.....	66
Tabela 6 –	Modificações propostas ao modelo de Clark III et al. (1991) para o ajuste de dados de <i>Tectona grandis</i> L.f., em região centro-sul do estado de Mato Grosso.....	67
Tabela 7 –	Análise descritiva das 100 árvores que compõem a base de dados do ajuste de funções de afilamento para <i>Tectona grandis</i> L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso.....	73
Tabela 8 –	Teste de acuracidade para estimativa dos diâmetros ao longo do fuste de <i>Tectona grandis</i> L. f., região centro-sul do estado de Mato Grosso.....	74
Tabela 9 –	Análise descritiva das doze árvores que compõem a base de dados da aplicação do modelo ajustado com os parâmetros fixos e os efeitos aleatórios calibrados para <i>Tectona grandis</i> L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso.....	75
Tabela 10 –	Modelos de relação hipsométrica avaliados para <i>Tectona grandis</i> L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso.....	80
Tabela 11 –	Modelos de diâmetro à 0,1 m de altura ($d_{0,1j}$) e de diâmetro à 0,2 m de altura ($d_{2,0j}$) avaliados para <i>Tectona grandis</i> L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso.....	81
Tabela 12 –	Modelos de diâmetro à 5,3 m de altura ($d_{5,3j}$) avaliados para <i>Tectona grandis</i> L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso.....	82
Tabela 13 –	Classes de sortimento para toras de <i>Tectona grandis</i> L.f., na região centro-sul do estado de Mato Grosso.....	83
Tabela 14 –	Descrição das variáveis do modelo de otimização proposto.....	88

Tabela 15 – Sistema de equação que compõe o modelo de distribuição diamétrica para <i>Tectona grandis</i> L.f.....	98
Tabela 16 – Parâmetros estimados no ajuste dos modelos de afilamento sem estratificação dos dados de <i>Tectona grandis</i> L. f., região centro-sul do estado de Mato Grosso.....	103
Tabela 17 – Estatísticas de ajuste e precisão para os modelos de afilamento sem estratificação dos dados de <i>Tectona grandis</i> L. f., região centro-sul do estado de Mato Grosso.....	104
Tabela 18 – Parâmetros estimados e estatísticas de ajuste e precisão obtidas no ajuste do modelo de Clark III et al. (1991) e das modificações propostas para o mesmo, <i>Tectona grandis</i> L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso.	109
Tabela 19 – Parâmetros estimados e estatísticas de ajuste e precisão obtidas no ajuste do modelo de Clark III et al. (1991) com os efeitos fixos e aleatórios, <i>Tectona grandis</i> L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso.....	111
Tabela 20 – Estatísticas auxiliares dos modelos de Clark III et al. (1991) original, somente com os coeficientes fixos e com os coeficientes fixos e aleatórios para avaliar as estimativas dos diâmetros relativos sem estratificação dos dados para <i>Tectona grandis</i> L,f, e o somatório das notas obtidas em cada altura relativa de medição.....	113
Tabela 21 – Parâmetros estimados e estatísticas de ajuste e precisão de ajustes dos modelos de relação hipsométrica para os dados de <i>Tectona grandis</i> L.f. sem estratificação, região centro sul do estado de Mato Grosso.....	119
Tabela 22 – Parâmetros estimados e estatísticas de ajuste e precisão dos ajustes dos modelos de diâmetro à 0,1 metro de altura para os dados de <i>Tectona grandis</i> L.f. sem estratificação, região centro-sul do estado de Mato Grosso.....	122
Tabela 23 – Parâmetros estimados e estatísticas de ajuste e precisão dos ajustes dos modelos de diâmetro à 2 metros de altura para os dados de <i>Tectona grandis</i> L.f. sem estratificação, região centro-sul do estado de Mato Grosso.....	124
Tabela 24 – Parâmetros estimados e estatísticas de ajuste e precisão dos ajustes dos modelos de diâmetro à 5,3 metros de altura para os dados de <i>Tectona grandis</i> L.f. sem estratificação, região centro-sul do estado de Mato Grosso.....	125
Tabela 25 – Sortimentos para <i>Tectona grandis</i> L.f. pelo modelo de Clark III et al. (1991) com efeito misto, índice de sítio 21, para a região centro-sul do estado de Mato Grosso.....	127
Tabela 26 – Sortimentos otimizados para maximização da receita de <i>Tectona grandis</i> L.f., índice de sítio 21, para a região centro-sul do estado de Mato Grosso..	136
Tabela 27 – Sortimentos otimizados para maximização do volume de <i>Tectona grandis</i> L.f., índice de sítio 21, para a região centro-sul do estado de Mato Grosso..	139

Tabela 28 –	Resumo da otimização dos sortimentos para <i>Tectona grandis</i> L.f. pelo modelo de Clark III et al. (1991) com efeito misto, índice de sítio 21, para a região centro-sul do estado de Mato Grosso.....	141
Tabela 29 –	Número de árvores estimado por hectare em povoamentos de <i>Tectona grandis</i> L.f. na ocasião de desbastes para o sítio de 21 metros para compor o primeiro cenário.....	143
Tabela 30 –	Número de árvores estimadas por hectare em povoamentos de <i>Tectona grandis</i> L.f., simulando corte raso aos 16 anos para os sítios de 17, 21 e 25 metros para compor o segundo cenário.....	144
Tabela 31 –	Resumo das receitas obtidas pela maximização da receita e do volume dos desbastes por sortimento de <i>Tectona grandis</i> L.f. pelo modelo de Clark III et al. (1991), com efeito misto, para o sítio de 21 metros, região centro-sul do estado de Mato Grosso.....	146
Tabela 32 –	Resumo das receitas obtidas pela maximização da receita e do volume dos sortimentos para <i>Tectona grandis</i> L.f. pelo modelo de Clark III et al. (1991), com efeito misto, simulando corte raso aos 16 anos para os sítios de 17, 21 e 25 metros, região centro-sul do estado de Mato Grosso.....	148

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

AIC	Critério de informação de Akaike
árv	Árvore
BIC	Critério de informação Bayesiano de Schwarz
d	Diâmetro a 1,3 m
$d_{0,1}$	Diâmetro a 0,1 m
$d_{2,0}$	Diâmetro a 2,0 m
$d_{28\%}$	Diâmetro a 28% da altura
$d_{5,3}$	Diâmetro a 5,3 m
$d_{6,4}$	Diâmetro a 6,4 m
$d_{73\%}$	Diâmetro a 73% da altura
DAP	Diâmetro a altura do peito ou diâmetro a 1,3 m
d_{fina}	Diâmetro na ponta fina da tora ou seção
DW	Teste de independência dos resíduos de Durbin-Watson
$f'(x)$	Primeira derivada da função x
$f''(x)$	Segunda derivada da função x
$f_{1,3}$	Fator de forma artificial
h	Altura
h_{100}	Altura dominante de Assmann
$h_{28\%}$	28% da altura total
$h_{73\%}$	73% da altura total
hd	Relação altura e diâmetro a altura do peito
i	Índice referente às seções da árvore
IM	Índice de Meyer
IMA	Incremento médio anual
IS	Índice de sítio
j	Índice referente à árvore
k	Índice referente ao sortimento
KS	Teste de normalidade dos resíduos de Kolmogorov-Smirnov
ℓ	Comprimento dos sortimentos, em metros
MOS	Módulo de otimização do sortimento
MTT	Módulo de traçamento das toras
NS	Matriz de disponibilidade dos sortimentos
p_i	Seção i da árvore
PLIM	Programação linear inteira mista
PMF	Ponto de mudança de forma
r	Parâmetro de forma

R_k	Receita do sortimento k
$R^2_{aj.}$	Coeficiente de determinação ajustado
S1	Sortimento 1: diâmetro na ponta fina superior ou igual à 49 cm, e 4,6 m de comprimento
S2	Sortimento 2: diâmetro na ponta fina superior ou igual à 39 cm, e 3,7 m de comprimento
S3	Sortimento 3: diâmetro na ponta fina superior ou igual à 29 cm, e 2,4 m de comprimento
S4	Sortimento 4: diâmetro na ponta fina superior ou igual à 19 cm, e 2,4 m de comprimento
S5	Sortimento 5: diâmetro na ponta fina superior ou igual à 7 cm, e 1,0 m de comprimento
$SQRes$	Soma de quadrado dos resíduos
$S_{yx}\%$	Erro padrão da estimativa em percentagem
ua	Unidade amostral
v	Volume
V_{toco}	Volume do toco
W	Teste de homocedasticidade de White
β	Coeficiente de regressão
μ	Efeito aleatório

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	27
1.1 OBJETIVO	29
1.1.1 Objetivo geral	29
1.1.2 Objetivos específicos	29
2. REVISÃO DE LITERATURA	31
2.1 ESPÉCIE	31
2.2 FORMA E AFILAMENTO DO TRONCO	33
2.3 FUNÇÕES DE AFILAMENTO.....	37
2.3.1 Tipos de funções de afilamento	39
2.4 MODELO COM EFEITO MISTO.....	44
2.4.1 Aplicação de modelagem de efeitos mistos em funções de afilamento 45	
2.4.2 Efeito misto não-linear	47
2.5 OTIMIZAÇÃO.....	49
3. METODOLOGIA	53
3.1 ÁREA DE ESTUDO E DADOS	56
3.1.1 Base de dados do ajuste	58
3.2 ESTUDO DOS PONTOS DE MUDANÇA DE FORMA DO FUSTE	61
3.3 PROCESSAMENTO DE DADOS	61
3.4 MODELOS DE AFILAMENTO	62
3.5 ESTRATIFICAÇÃO DOS DADOS E ALTERAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO MODELO	
.....	66
3.5.1 Classes de estratificação	66
3.5.2 Modificações propostas ao modelo de Clark III et al. (1991)	67
3.6 MODELAGEM NÃO LINEAR DE EFEITO MISTO	71
3.6.1 Estatísticas auxiliares	73
3.6.2 Representação gráfica dos ajustes	74
3.6.3 Aplicação do modelo fixo com os efeitos aleatórios	74
3.7 AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DOS MODELOS	75
3.7.1 Seleção das equações	75
3.7.2 Condicionantes da regressão	76
3.7.3 Avaliação de multicolinearidade das equações	76
3.7.4 Avaliação estatística das equações não lineares com efeito misto	76
3.8 VOLUME.....	77
3.8.1 Volume calculado pela integral da função de afilamento	77
3.9 TABELA DE SORTIMENTO	79
3.9.1 Altura dominante	79
3.9.2 Relação hipsométrica	80
3.9.3 Diâmetros à 0,1 e 2,0 m de altura	81
3.9.4 Diâmetro à 5,3 m de altura	82
3.9.5 Sortimentos	83
3.10 SISTEMA DE ANÁLISE, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO SORTIMENTO	
FLORESTAL.....	83

3.10.1	Definição do modelo matemático	88
3.10.2	Função objetivo.....	90
3.10.3	Conjunto de restrições	91
3.10.4	Exemplo didático	93
3.10.5	Cenários.....	98
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	99
4.1	ESTUDO DESCRITIVO DA FORMA DO FUSTE.....	99
4.2	AJUSTE DOS MODELOS DE AFILAMENTO SEM ESTRATIFICAÇÃO.....	101
4.3	ESTRATIFICAÇÃO COMO REDUTOR DA VARIABILIDADE NO AJUSTE DE MODELOS	106
4.3.1	Modificações propostas ao modelo de Clark III et al. (1991).....	109
4.4	MODELO DE EFEITO MISTO NÃO LINEAR	110
4.4.1	Desempenho pelas estatísticas auxiliares e representação gráfica dos ajustes 113	
4.4.2	Aplicação do modelo fixo com os efeitos aleatórios em uma base de dados distinta 117	
4.5	VOLUME	118
4.6	TABELA DE SORTIMENTO.....	119
4.6.1	Relação hipsométrica	119
4.6.2	Diâmetros de calibração dos efeitos aleatórios	121
4.6.3	Sortimentos para <i>Tectona grandis</i> L.f. na região centro-sul do estado de Mato Grosso	126
4.7	SISTEMA DE ANÁLISE, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO SORTIMENTO FLORESTAL	130
4.7.1	Análise e simulação.....	130
4.7.3	Otimização dos sortimentos florestais	135
4.7.4	Cenários.....	143
5.	CONCLUSÃO.....	149
	BIBLIOGRAFIA.....	151
	APÊNDICE A – CALIBRAÇÃO DOS EFEITOS ALEATÓRIOS DA EQUAÇÃO DE CLARK III ET AL. (1991) COM EFEITO MISTO PARA UMA ÁRVORE DE <i>Tectona grandis</i> L. F. PROVENIENTE REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO	167
	APÊNDICE B – ESTRUTURA DO CONJUNTO DE RESTRIÇÕES QUE COMPÕEM A MATRIZ DE PARÂMETROS A PARA A SOLUÇÃO DE OTIMIZAR E MAXIMIZAR A RECEITA DOS SORTIMENTOS	171
	APÊNDICE C – VALORES MÍNIMOS, MÉDIOS E MÁXIMOS DE DAP E ALTURA TOTAL DOS PONTOS DE MUDANÇA DE FORMA DO FUSTE POR CLASSE DIAMÉTRICA UTILIZANDO O MODELO DE SCHÖEPFER (1966) PARA <i>Tectona grandis</i> L.F., 2018	173

APÊNDICE D – RESÍDUOS DAS ESTIMATIVAS DOS DIÂMETROS AO LONGO DO FUSTE (d_i), PELAS EQUAÇÕES DE AFILAMENTO SEM ESTRATIFICAÇÃO DOS DADOS DE *Tectona grandis* L. F., REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO..... 175

APÊNDICE E – RESÍDUOS DAS ESTIMATIVAS DOS DIÂMETROS EM FUNÇÃO DA ALTURA RELATIVA (h_i/h), PELAS EQUAÇÕES DE AFILAMENTO SEM ESTRATIFICAÇÃO DOS DADOS DE *Tectona grandis* L. F., REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO 177

APÊNDICE F – PARÂMETROS ESTIMADOS NOS AJUSTES DO MODELO DE CLARK III ET AL. (1991) E MODIFICAÇÕES ESTRATIFICADOS POR CLASSE DE DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO, PARÂMETRO “ r ” E FATOR DE FORMA ARTIFICIAL PARA OS DADOS DE *Tectona grandis* L.F., REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO..... 179

APÊNDICE G – RESÍDUOS DAS ESTIMATIVAS DOS DIÂMETROS RELATIVOS, PELAS EQUAÇÕES DE CLARK III ET AL. (1991) E MODIFICAÇÕES PROPOSTAS PARA OS DADOS DE *Tectona grandis* L.F., REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO 181

APÊNDICE H – ESTATÍSTICA DO CRITÉRIO INFORMAÇÃO BAYESIANO DE SCHWARZ PARA O AJUSTE DO MODELO DE CLARK III ET AL. (1991) COM A COMBINAÇÃO DE EFEITOS FIXOS E UM EFEITO ALEATÓRIO E PARA A COMBINAÇÃO DE EFEITOS FIXOS E DOIS EFEITOS ALEATÓRIOS, EM NÍVEL DE CLASSE DE DIÂMETRO (DAP) E EM NÍVEL DE ÁRVORE, *Tectona grandis* L.f., REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO 183

APÊNDICE I – RESÍDUOS DAS ESTIMATIVAS DOS DIÂMETROS PELAS EQUAÇÕES DE CLARK III ET AL. (1991), COM EFEITO MISTO, PARA UM E PARA DOIS COEFICIENTES EM NÍVEL DE CLASSE DE DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO (DAP) E EM NÍVEL DE ÁRVORE, PARA OS DADOS DE *Tectona grandis* L.F., REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO 185

APÊNDICE J – ESTATÍSTICAS DE AJUSTE E PRECISÃO OBTIDAS NO AJUSTE DO MODELO DE CLARK III ET AL. (1991) COM EFEITO MISTO PARA AS DIFERENTES POSIÇÕES DE CALIBRAÇÃO DOS EFEITOS ALEATÓRIOS, *Tectona grandis* L.F., REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO 187

APÊNDICE K – RESÍDUOS DAS ESTIMATIVAS DAS ALTURAS EM FUNÇÃO DAS ALTURAS ESTIMADAS, DESENVOLVIDOS PELAS RELAÇÕES HIPSOMÉTRICAS AJUSTADAS PARA *Tectona grandis* L. F., REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO 191

APÊNDICE L – RESÍDUOS DAS ESTIMATIVAS DAS ALTURAS EM FUNÇÃO DA VARIÁVEL INDEPENDENTE DOS MODELOS DE RELAÇÃO HIPSOMÉTRICA AJUSTADOS PARA *Tectona grandis* L. F., REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO 193

APÊNDICE M – RESÍDUOS DAS ESTIMATIVAS DOS DIÂMETROS À 0,1 M DE ALTURA, PELAS EQUAÇÕES DE AFILAMENTO SEM ESTRATIFICAÇÃO DOS DADOS DE *Tectona grandis* L. F., REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO 195

APÊNDICE N – RESÍDUOS DAS ESTIMATIVAS DOS DIÂMETROS À 2,0 M DE ALTURA, PELAS EQUAÇÕES DE AFILAMENTO SEM ESTRATIFICAÇÃO DOS DADOS DE *Tectona grandis* L. F., REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO 197

APÊNDICE O – RESÍDUOS DAS ESTIMATIVAS DOS DIÂMETROS À 5,3 M DE ALTURA, PELAS EQUAÇÕES DE AFILAMENTO SEM ESTRATIFICAÇÃO DOS DADOS DE *Tectona grandis* L. F., REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO 199

APÊNDICE P – MAXIMIZAÇÃO DA RECEITA DOS SORTIMENTOS DA ÁRVORE CENTRAL NA OCASIÃO DE DESBASTES PARA O SITIO DE 21 METROS, PARA *Tectona grandis* L.f. PELO MODELO DE CLARK III ET AL. (1991), COM EFEITO MISTO, REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO 201

APÊNDICE Q – MAXIMIZAÇÃO DO VOLUME DOS SORTIMENTOS PARA *Tectona grandis* L.f. PELO MODELO DE CLARK III ET AL. (1991), COM EFEITO MISTO, NA OCASIÃO DE DESBASTES PARA O SITIO DE 21 METROS, REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO 203

APÊNDICE R – MAXIMIZAÇÃO DA RECEITA DOS SORTIMENTOS PARA *Tectona grandis* L.f. PELO MODELO DE CLARK III ET AL. (1991), COM EFEITO MISTO, CORTE RASO AOS 16 ANOS PARA OS SÍTIOS DE 17, 21 E 25 METROS, REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO 205

APÊNDICE S – MAXIMIZAÇÃO DO VOLUME DOS SORTIMENTOS PARA *Tectona grandis* L.f. PELO MODELO DE CLARK III ET AL. (1991), COM EFEITO MISTO, CORTE RASO AOS 16 ANOS PARA OS SÍTIOS DE 17, 21 E 25 METROS, REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO 207

1. INTRODUÇÃO

A apreciação da madeira de *Tectona grandis* L.f. no mercado internacional torna os seus plantios importantes fontes de renda e investimentos aos produtores, além de oferecer vantagens sobre outras espécies tropicais e temperadas devido as suas características de crescimento e qualidade de sua madeira. Portanto, os plantios da espécie oferecem oportunidade de atender este mercado.

Nas últimas décadas, os plantios de *Tectona grandis* têm alcançado destaque no setor florestal brasileiro com a perspectiva de retorno dos investimentos em curto e médio prazo (SHIMIZU et al., 2007). A área plantada com *Tectona grandis* no ano de 1986 em todo o território brasileiro superava os 10 mil hectares, enquanto em 2016 a área plantada era de, aproximadamente, 87.410 ha (COELHO et al., 2017).

Apesar de ser uma das primeiras espécies a serem usadas em plantações florestais, e tendo uma longa história de plantio nos trópicos, ainda há muita pesquisa necessária para desenvolver seu pleno potencial (LADRACH, 2009). O mercado madeireiro se torna cada vez mais competitivo, exigindo o desenvolvimento e aplicação de técnicas e ferramentas a fim de reduzir custos e desperdícios nos processos de produção de um empreendimento florestal. Assim, quantificar os estoques florestais de forma acurada requer estudos recorrentes relacionados ao volume das árvores, seja de forma individual ou de todo o povoamento.

Na produção florestal, principalmente a de madeira serrada, o objetivo é maximizá-la, diminuindo o desperdício causado na transformação, seja primária ou secundária da madeira. Nesse contexto o desenvolvimento de técnicas de modelagem para subsidiar a tomada de decisão acerca dos processos produtivos se torna imprescindível. Dentre as inúmeras técnicas para obtenção de estimativas volumétricas, as funções de afilamento descrevem o perfil dos fustes em termos de diâmetro à altura do peito e altura, comercial ou total, e são ferramentas utilizadas por gestores florestais para fornecer informações exatas e oportunas sobre as intervenções no processo de crescimento da floresta (MUHAIRWE, 1999).

Essas funções, além de estimarem o volume parcial ou total de cada árvore, permitem estimar o diâmetro medido em qualquer altura do fuste, assim como alturas até

quaisquer diâmetros. A principal aplicação de funções de afilamento é estimar as dimensões e o volume ao longo dos fustes para obtenção de produtos, como madeira para serraria, celulose, laminação, entre outros, com a precisão requerida. No Brasil os estudos onde se emprega a aplicação de funções de afilamento ainda são escassos devido à complexidade dos ajustes e aplicações, e a maioria dos trabalhos são de *Pinus* sp., *Eucalyptus* sp. e *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze (COSTA et al., 2016; FIGUEIREDO FILHO et al. 2015; KOHLER et al., 2015).

A necessidade de otimização do uso dos recursos florestais, dentro do conceito de múltiplos produtos da madeira, tem justificado e estimulado a realização de importantes estudos sobre o assunto. Atualmente, mais do que aumentar a área plantada, há preocupação em melhorar a produtividade dos povoamentos florestais e garantir o fluxo contínuo de matéria-prima, e a aplicabilidade desses estudos é clara, principalmente sob o ponto de vista do planejamento da produção de grandes empresas do setor florestal.

Quando bem manejadas e direcionadas para obter múltiplos produtos, as florestas garantem a maximização dos lucros na medida em que são adotadas práticas com o objetivo de agregar valor à madeira. Além de reduzir o impacto das oscilações do mercado sobre cada produto individualmente (ASSIS et al., 2002). Assim, faz-se necessário pesquisas constantes sobre novas funções e técnicas de ajuste para melhoria na qualidade das predições reduzindo erros e, conseqüentemente, desperdícios com a utilização dos fustes.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivo geral

Descrever a forma do tronco e avaliar a receita dos sortimentos de árvores oriundas de plantios de *Tectona grandis* L.f, localizadas na região centro-sul estado do Mato Grosso, e desenvolver um simulador para fornecer, ao produtor florestal, informações técnicas e econômicas adequadas ao planejamento do povoamento florestal.

1.1.2 Objetivos específicos

- Descrever o perfil dos fustes com três pontos de mudança de forma no fuste;
- Selecionar a equação de melhor desempenho para as estimativas dos diâmetros ao longo do tronco da espécie, propiciada por ajustes de funções de afilamento para o conjunto das árvores;
- Avaliar a equação de afilamento selecionada com a inserção de variáveis para descrever a forma associada à classe diamétrica e à árvore;
- Avaliar a equação de afilamento selecionada para estimar volumes de múltiplos produtos da madeira, e gerar tabela de sortimento;
- Desenvolver um sistema de análise e simulação para otimização da receita e do volume dos sortimentos em função da demanda por tipo de multiproduto e seus valores de mercado.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 ESPÉCIE

A *Tectona grandis* Linn. f. é uma espécie arbórea decídua de floresta tropical da família Lamiaceae (APGIV, 2016), popularmente conhecida como teca ou teak (FIGUEIREDO et al., 2005), de ocorrência natural em regiões com clima de monção (LAMPRECHT, 1990). Natural do Sul e Sudeste do continente asiático, vem ocupando espaço de destaque no mercado entre as principais espécies produtoras de madeira tropical, sendo cultivada em diversas regiões da África e das Américas do Sul e Central (BERMEJO et al., 2004; KRISHNAPILLAY, 2000; PANDEY; BROWN, 2000; TANAKA et al., 1998).

A *Tectona grandis* é uma espécie heliófila muito exigente que requer amplo espaço de crescimento para o desenvolvimento adequado (RYAN, 1982 apud WEAVER, 1993). A árvore atinge alturas entre 25 e 35 m (LORENZI et al., 2003), tronco retilíneo com casca áspera e fina (CHAVES; FONSECA, 1991) e o sistema radicular é superficial, podendo ou não haver raízes tabulares (FIGUEIREDO, 2005; PANDEY; BROWN, 2000). As folhas da espécie são elípticas ou obovadas, coriáceas, opostas e verticeladas em plantas jovens, de cor verde escura na superfície adaxial e verde clara na superfície abaxial tomentosa, e áspera ao tato. Geralmente, medem entre 20 e 35 cm de largura e 25 e 50 cm de comprimento (CARDOSO, 1991; WEAVER, 1993).

Cultura perene com ciclo que varia de 25 a 80 anos (FIGUEIREDO, 2001; UGALDE; PÉREZ, 2001), e a produtividade dos povoamentos varia em decorrência da diversidade climática combinada com as características litólicas e os diferentes graus de tratamentos culturais dedicados aos plantios (SINHA et al., 2011; TONINI et al., 2009). No caso do Brasil, o ciclo de 25 anos nas plantações de *Tectona grandis* se deve principalmente ao elevado incremento médio anual (IMA), que tem variado de 12 a 24 m³.ha⁻¹.ano (COUTINHO, 2017), superior aos outros países, como Índia e Java, com IMA de aproximadamente 8 m³.ha⁻¹.ano e ciclos de 60 a 80 anos (OLIVEIRA et al., 2007).

Por conseguinte, o interesse na espécie como alternativa aos plantios florestais tradicionais no Brasil vem crescendo (SCHUHLI; PALUDZYSZYN FILHO, 2010). O país

possui a maior área plantada da América Latina, 87.502 ha de plantações de *Tectona grandis*, espalhados pelos estados de Mato Grosso, Pará, Rondônia, Acre, Goiás, Minas Gerais, dentre outros. O Mato Grosso seguido pelo Pará concentram mais de 90% da área plantada no Brasil (COUTINHO, 2017).

A *Tectona grandis* alcançou destaque mundial no mercado de produtos madeireiros, devido a qualidade de sua madeira, principalmente, para usos nobres (COSTA et al., 2007; MORA; HERNANDEZ, 2007). Sua madeira representa uma combinação de beleza, estabilidade, durabilidade e resistência. Muito utilizada na construção naval, construção de móveis, estruturas, pisos, chapas, painéis, postes e dormentes, especialmente na produção de peças e móveis finos devido a sua resistência à ação do sol, calor, frio, água de chuva e do mar, além de ser facilmente trabalhada (CRUZ, 2005; GOMES, 2002; RONDON NETO et al., 1998).

Estudos químicos com a espécie têm registrado a presença de uma substância pertencente à classe das antraquinonas, a tectoquinona, à qual tem sido atribuída a durabilidade da madeira quando exposta aos rigores das intempéries (THULASIDAS; BHAT, 2007). Além de outras substâncias como o lapachol e uma naftoquinona-antraquinona, a tectograndona, que é um corante natural (AGNALDO et al., 1993).

Além de usos madeireiros, as folhas são utilizadas como embalagens de açougue e extração de corantes (GOMES et al., 2011), extratos para obtenção de inseticida com a finalidade de controlar cupins (SANTOS et al., 2009) e folhas em pó como adsorventes de resíduos de tintura para tratamento de efluentes industriais (PONNUSAMI et al., 2009). A *Tectona grandis* vem sendo investigada na farmacologia para atividades antioxidantes, antiinflamatórias, antipiréticas, citotóxicas, analgésicas, hipoglicêmicas, cicatrizantes e antiplasmodiais (VYAS et al., 2018).

A madeira da *Tectona grandis* é considerada uma alternativa às espécies de alto valor econômico para o suprimento contínuo às indústrias de base florestal (COUTINHO, 2017). Além da possibilidade de comercialização de produtos desde os primeiros desbastes (COELHO et al., 2017), também existe o potencial para o mercado de sequestro de carbono (ENTERS, 2000) e produtos não madeireiros (GOMES et al., 2011), o que torna a espécie um investimento lucrativo aos seus produtores (ÂNGELO et al., 2009).

2.2 FORMA E AFILAMENTO DO TRONCO

A forma e o afilamento do fuste de árvores têm sido estudados por mais de um século e ainda são temas de muitos trabalhos na pesquisa florestal (MÔRA, 2015). Além de afetarem o volume total, influenciam na qualidade e na quantidade dos multiprodutos extraídos das árvores (FIGUEIREDO FILHO et al., 2014).

O tronco das árvores pode apresentar forma bastante variável, modificando-se de acordo com a espécie e até mesmo dentro da mesma espécie (GOMES, 1957; LARSON, 1963). Do ponto de vista dendrométrico, a forma se refere à geometria do tronco - neiloide, parabolóide e cone – que deve ser constante. Enquanto o afilamento se refere à taxa de diminuição do diâmetro com o aumento da altura no tronco e sofre variações por árvore, podendo ser expressa por uma função matemática que descreve essa taxa de diminuição (FINGER et al., 1995; GRAY, 1956; MUHAIRWE, 1993; NEWNHAM, 1992).

As árvores muitas vezes são consideradas compostas de três seções: a parte superior cônica (que inclui a copa), seções parabolóides abaixo da copa e a seção da base um neiloide. Dentro dessas seções, várias irregularidades ocorrem na forma das árvores (ASSMANN, 1970; HUSCH et al., 1972; LOETSCH et al., 1973), sendo causadas principalmente por mudança abrupta de diâmetro em um nó; deformidade após a lesão no câmbio; mudança abrupta de diâmetro associado a podridão no centro; inchaço por oclusão de ramos; ou a influência do inchamento de raízes, pilares, ou ranhuras no tronco. Estas irregularidades variam de acordo com a densidade nas parcelas, espécie, local, idade e outras variáveis (GRAY, 1956; LARSON, 1963).

Os modelos dendrométricos visam analisar o perfil das árvores através de recursos matemáticos, comparando os “protótipos dendrométricos” à forma do tronco das árvores ou a partes deste, com o objetivo de determinar seu volume (FINGER, 1992). Os pontos de transição ou limites desses sólidos são de difícil determinação nos troncos, sendo, pois de pouca importância prática. No entanto, desempenham um grande valor teórico na definição de expressões matemáticas que descrevem a forma do tronco (FIGUEIREDO FILHO, 1991).

A forma do tronco das árvores é influenciada por vários fatores como: sítio (FIGUEIREDO FILHO, 1991; LARSON, 1963), idade (AHRENS; FRIEDL, 1989; HOLBERT, 1981; MACHADO, 1982;), espaçamento (FRIEDL, 1989; LARSON, 1963; SILVA, 1974), desbaste (LARSON, 1963; SCOLFORO; FIGUEREDO FILHO, 1998; SMITH et al., 1997), poda e a posição sociológica (LARSON, 1963; SCOLFORO; FIGUEREDO FILHO, 1998).

Na tentativa de explicar a variabilidade da forma da árvore, quatro teorias foram propostas (ASSMANN, 1970; GRAY, 1956; LARSON, 1963): nutricional, condução de água, mecanicista e hormonal. Porém, nenhuma teoria desenvolvida explica adequadamente a variação de forma, tanto dentro como entre as árvores. Assim, não tem sido possível desenvolver uma função de afilamento satisfatória que consistentemente seja melhor para todas as dimensões estimadas nas árvores, para todas as espécies e uniformemente aceitável em uma ampla gama de condições geográficas (MUHAIRWE, 1993).

Além das condições edafoclimáticas, tratamentos silviculturais e posição sociológica em que a árvore se desenvolve, a forma do fuste também varia com a idade, quer seja como fenômeno evolutivo natural, ou como resultado das várias fases de concorrência relativas às árvores vizinhas (FINGER et al., 1995; LARSON, 1963). As árvores que crescem isoladas mantêm a copa proporcionalmente mais comprida e o tronco assume então forte conicidade (PRESSLER, 1864 apud FRIEDL, 1989). O mesmo pode ser observado nas árvores jovens ou que crescem em povoamentos, mas que possuem um crescimento livre, característico das árvores dominantes que normalmente apresentam uma copa mais vigorosa (FIGUEIREDO FILHO, 1991). Quando o dossel do povoamento começa a fechar, iniciando a concorrência, os galhos inferiores morrem e com isso se produz um fuste livre de galhos e conseqüentemente mais alto. O decréscimo do comprimento da copa e outros fatores associados resultam em decréscimo da conicidade do fuste. Em geral o efeito da densidade sobre a forma do tronco implica que quanto maior a densidade, maior é o decréscimo do comprimento da copa e mais o tronco se aproxima do cilindro (FRIEDL, 1989).

A competição afeta a forma do tronco das árvores como conseqüência da distribuição dos incrementos, pois, sob competição, as árvores apresentam dois pontos

de máximo no acúmulo do incremento sobre o mesmo, na base e na porção superior, proporcionando forma mais cilíndrica (ASSMANN, 1970). De forma análoga, ao considerar todas as variáveis associadas à densidade das áreas, vários autores relatam que as árvores se tornam mais cilíndricas com o aumento da densidade e diminuição do comprimento da copa (BURGER, 1939, 1951; GEVORKIANTZ; HÄRDTL, 1938; HOSLEY, 1955; PECHMANN; SCHAILE, 1955; VORREITER, 1937 apud LARSON, 1963; KOTZE, 1960).

Os desbastes resultam em alteração do crescimento da copa que será refletido por uma variação na forma do tronco (LARSON, 1963). A competição entre as árvores dentro do povoamento diminui o crescimento em diâmetro e favorece o aumento do afilamento no fuste. Entretanto, quando se realiza desbastes leves, na maior parte das vezes, produzem árvores com menos galhos e fustes mais cilíndricos do que desbastes pesados, que tendem a aumentar a conicidade (FLURY, 1903 apud LARSON, 1963).

Com relação à idade, há uma tendência natural do tronco das árvores se tornarem mais cilíndricos com o seu aumento. Nas idades jovens a mudança da forma é bastante rápida, enquanto que nas idades avançadas a forma muda lentamente. A taxa de mudança de forma da árvore devido à idade pode variar entre as diferentes classes de copas ou posições sociológicas dentro do mesmo povoamento (STOATE, 1941; FRIEDL, 1989).

A poda causa redução de incremento na base do tronco e concentração de incremento na parte superior (LARSON, 1963). Dessa forma, o afilamento do tronco pode estar relacionado com as diferenças na intensidade de poda, ou seja, com a sua severidade (LÜCKHOFF, 1949; PRESSLER, 1872; YOUNG; KRAMER, 1952 apud LARSON, 1963), da época em que é aplicada e das características das copas das árvores (KOSLOWSKI, 1971).

Com a diminuição da qualidade do sítio, o crescimento em altura diminui para árvores de mesmo diâmetro, aumentando assim o afilamento do tronco (BURGER, 1951; LAPPI-SEPPÄLÄ, 1929 apud LARSON, 1963). Fato também relatado por Figueiredo Filho (1991), em sítios de baixa capacidade produtiva o crescimento em altura para árvores de mesmo diâmetro é menor e como consequência o fuste é mais afilado.

Embora o fuste não possa ser completamente descrito em termos matemáticos, é comum e conveniente supor que os segmentos do mesmo sejam aproximados a vários sólidos ou troncos de sólidos geométricos (HUSCH et al., 2003). Isto sugere que três modelos sejam necessários para descrever o afilamento da árvore, um para a parte inferior, meio e parte superior do fuste. Estes três modelos podem ser unidos para formar um único que pode ser analisado por técnicas de regressão. Técnicas para lidar com modelos de regressão deste tipo, chamados de modelos de regressão polinomial segmentadas, tiveram uma atenção considerável na literatura estatística, por exemplo, Fuller (1969), Gallant e Fuller, (1973) e Gallant (1974) e aplicados na área florestal por Max e Burkhart (1976), Demaerschalk e Kozak (1977), Cao et al. (1980), Parresol et al. (1987) e Clark III et al. (1991).

Nos estudos florestais, a forma do tronco tem como uma de suas funções fornecer informações para estimar o volume da árvore. O estudo do afilamento pode ser realizado por meio de quatro abordagens. Dessas quatro, três são baseadas em relações simples: fatores de forma, derivados a partir da relação entre os volumes; quocientes de forma, obtidos a partir da razão entre diâmetros; e os pontos de forma, correspondente à razão entre as alturas. A outra linha é baseada em funções mais complexas, como as funções de afilamento (CANCINO, 2006; SCOLFORO et al., 1998).

O fator de forma é influenciado principalmente pela espécie, sítio, espaçamento, desbaste, idade, herdabilidade e o ponto onde é calculada a área seccional. Devido a praticidade e a irregularidade da seção causada pelo sistema radicular, é sempre qualificado ao nível do diâmetro a altura do peito (DAP) (FERREIRA, 1999). Após o diâmetro e a altura, o fator de forma constitui a terceira variável, em ordem de importância, na estimação de volumes. O crescimento em altura é o elemento que mais influencia o fator de forma, uma vez que, duas árvores geometricamente idênticas e com alturas diferentes, possuem diferentes fatores de forma artificial. Isso ocorre porque a variável altura não acarreta variação proporcional no volume da árvore quando se toma para comparação o cilindro ideal (FINGER, 1992).

2.3 FUNÇÕES DE AFILAMENTO

O volume total das árvores comumente é estimado por meio de equações de volume. Essas equações preveem o volume total ou comercial das árvores com base no diâmetro à altura do peito, ou seja, o volume de árvores da altura do toco a algum diâmetro superior ou limite de altura. Quando equações para diferentes volumes comerciais são ajustadas de forma independente, podem causar estimativas incompatíveis que são produzidas por diferentes volumes comerciais de um único tronco (CAO et al., 1980).

Um dos métodos alternativos consistia em ajustar uma curva ou uma equação que descrevia o perfil médio da árvore e utilizava as estimativas resultantes de diâmetros medidos no tronco para calcular os volumes das unidades desejadas (BRUCE et al., 1968). Tabelas, assim construídas, poderiam ser consistentes entre si, e outras poderiam ser preparadas, conforme houvesse necessidade, a partir das curvas de afilamento.

O modelo matemático do perfil do tronco pode ser integrado para obtenção do volume, e os diâmetros nas seções podem ser estimados em qualquer altura, bem como as alturas dos diâmetros em quaisquer seções (DEMAERSCHALK, 1972). As funções de afilamento para prever o diâmetro em qualquer ponto do fuste da árvore podem ser integradas para encontrar o volume contido dentro de qualquer seção específica do fuste da árvore (DEMAERSCHALK, 1973; KOZAK et al., 1969,), assim como estimar seus usos.

Os primeiros esforços para desenvolver funções de afilamento para descrever a relação entre o diâmetro e a altura parecem ter se concentrado principalmente na parte comercial do tronco (geralmente abaixo da copa) e eram relativamente simples, como as fórmulas de Höjer em 1903 (BEHRE, 1923), Jonson em 1910 e 1911 (BEHRE, 1923) e Behre (1923). Uma das dificuldades iniciais na utilização dessas funções se devia ao trabalho computacional envolvido no ajuste e o uso de muitas equações simplificadas, que por sua vez não descreviam de forma satisfatória as extremidades dos fustes das árvores. Mas essas limitações começaram a ser superadas através da introdução do uso do computador eletrônico (BRUCE et al., 1968)

Nos estudos de usos e de manejo mais intensivo das florestas, surgiu a necessidade de funções de afilamento com estimativas mais acuradas que descrevessem o perfil ao longo do tronco (NEWNHAM, 1992). Várias abordagens foram testadas, e talvez a mais lógica, é o desenvolvimento de uma função separada para cada porção do fuste com a restrição de que as funções se juntem suavemente em cada ponto de aderência, como a função de Max e Burkhart (1976).

Outros investigadores utilizaram funções polinomiais individuais, incluindo seis ou mais termos nas equações de regressão e os termos com potências elevadas (BRUCE et al., 1968), principalmente para assegurar bons resultados na base do fuste. Métodos mais sofisticados incluem a análise de componentes principais (FRIES, 1965; LIU; KEISTER, 1978), funções *splines* cúbicas (LIU, 1980), e o método de diâmetro no ponto de Ormerod (1986).

A partir do avanço das tecnologias e das dificuldades de ajuste dos modelos segmentados, Newnham (1988) e Kozak (1988) iniciaram os trabalhos com modelos de forma variável na década de 1980. Com base nessa ideia, desenvolveram uma nova abordagem com uma função contínua que descreve a forma do tronco do solo ao topo usando um "expoente variável" para descrever o neiloide, parabolóide e formas cônicas do caule (KOZAK, 1988). A principal vantagem das estimativas por esse sistema, é que são geralmente muito mais fáceis de ajustar e fornecem melhores estimativas ao longo de todo o fuste da árvore (KOZAK, 2004).

Estudos como os de Gregoire e Schabenberger (1996), Leites e Ronbinson (2004), Lejeune et al. (2009), Yang et al. (2009), Cao e Wang (2011) e Özçelik et al. (2011) demonstraram a utilização da técnica de modelagem de efeitos mistos não linear aplicada às funções de afilamento de maneira a estudar a interação das variáveis dendrométricas mensuradas nas seções da mesma árvore e entre as árvores do conjunto estudado.

No Brasil, os primeiros trabalhos com funções de afilamento foram propostos por Ahrens e Holbert em 1981, que utilizaram a função de Höjer (1903), funções polinomiais e componentes principais, e por Borges em 1981, com a função de Schöepfer (1966), para estimar a forma do tronco e volume de *Pinus taeda* L. Quase uma década depois, Kirchner et al. (1989) e Figueiredo Filho (1991) propuseram estimar o volume de *Pinus elliotti* L. com funções *splines*, e Figueiredo Filho et al. (1996a) estimaram o volume de

P. taeda. com as funções segmentadas de Max e Burkhart (1976), Paressol et al. (1987) e Clark III et al. (1991).

Já a utilização dos modelos de forma variável e modelagem de efeito misto no Brasil é recente. Destaca-se Machado (2009) que utilizou o modelo de Bi (2000), Andrade (2014) com modelos de forma variável, Carvalho (2013) utilizando a modelagem de efeitos mistos para estudar o perfil do fuste, e Môra (2015) que comparou modelos de forma variável com modelos não segmentados e segmentados, examinando também o efeito da modelagem de efeitos mistos não linear nesses modelos.

As funções de afilamento têm sido um dos temas mais importantes de estudo em mensuração e manejo florestal por quase um século (FANG et al., 1999), pois constituem uma importante ferramenta estatística de uso corrente na determinação dos perfis de troncos (PRODAN et al., 1997). Muitas formas e tipos de modelos de afilamento têm sido relatados e avaliados em relação à exatidão (STERBA, 1980). Estas funções são ferramentas úteis para estimar diâmetros de toras e volumes comerciais (TRINCADO; BURKHART, 2006). Segundo Newnham (1988), uma função de afilamento é necessária para estimar o volume de árvores em pé para usos múltiplos, principalmente para o planejamento dos melhores talhões para produção ou outros fins como informações sobre tamanhos de seções, os melhores diâmetros e comprimentos.

2.3.1 Tipos de funções de afilamento

As características desejáveis de qualquer função de afilamento são a possibilidade de estimar o diâmetro na ponta de cada tora, a possibilidade de estimar diretamente a altura para qualquer diâmetro do tronco, sendo esta especialmente útil para a determinação da altura comercial de um determinado diâmetro; e, finalmente, que a função de forma possa ser integrada, obtendo-se assim uma função compatível de volume (PRODAN et al., 1997).

2.3.1.1 Modelos não segmentados

Dentre as diversas técnicas estatísticas de modelagem, destacam-se os modelos não segmentados, que conseguem aliar eficiência com a simplicidade de aplicação (DEMAERSCHALK; KOZAK, 1977). Os primeiros modelos desenvolvidos e utilizados

foram os polinômios de pequena ordem em termos de altura relativa no fuste (ROJO et al., 2005). Kozak et al. (1969) desenvolveram uma função de afilamento com base no pressuposto de que o fuste da árvore é um parabolóide quadrático e a equação se baseia em um polinômio quadrático de segunda ordem. Como algumas funções de afilamento eram inadequadas para descrever a área perto da base do tronco, polinômios de grau mais elevado foram utilizados para caracterizar corretamente a base (ROJO et al., 2005). Alguns modelos como de Schöepfer (1966), Bruce et al. (1968) e Goulding e Murray (1976) utilizam polinômios de graus elevado para caracterizar o perfil do fuste.

Em 1972 e 1973, Demaerschalk desenvolveu funções de afilamento a partir de sistemas integrados para estimativas volumétricas das quais as funções de afilamento são derivadas de equações de volume total baseadas no modelo de Schumacher e Hall (1933), modelo de Spurr (1952), no modelo de Honer (1965) e outras variações. Entre outros, os modelos de Matte (1949), Ormerod (1973), Forslund (1982, 1991), Amidon (1984), Biging (1984), Newberry e Burkhart (1986), Baldwin Junior e Feduccia (1991) e Sharma e Oderwald (2001) apresentam como variável dependente a relação de qualquer diâmetro ao longo do tronco pelo DAP (d_i/d) ou $(d_i/d)^2$ e a variável independente representada pelas variáveis altura na posição i (h_i) e altura da árvore (h), e as suas derivações e relações. Alguns autores testaram novas variáveis ou formulações como variáveis dependentes e independentes nas funções de afilamento. Por exemplo, Thomas e Parresol (1991) introduziram conceitos de trigonometria nas funções enquanto Benbrahim e Gavaland (2003) o diâmetro na base como variável independente no lugar do DAP.

Os mais antigos modelos e a maioria das funções de afilamento desenvolvidos até hoje pertencem à categoria de modelos de afilamento não segmentados. No entanto, as previsões insatisfatórias algumas vezes geradas por esses modelos têm mantido muitos pesquisadores da área à procura de outros para melhorar a previsão das variáveis. Isto levou ao desenvolvimento de modelos mais complexos, tais como os segmentados e os de forma variável (MUHAIRWE, 1993), e a utilização de outras técnicas de ajuste, além do mínimo quadrado ordinário (MÔRA, 2015).

Importantes estudos envolvendo modelos polinomiais não-segmentados vem sendo desenvolvidos no Brasil (EISFELD et al., 2004). No entanto, dentre os estudos

existentes poucos abordam as estimativas volumétricas, quando, na verdade, um modelo que estime diâmetros satisfatoriamente não fornece, necessariamente, boas estimativas de volume (ASSIS et al., 2002).

Esses modelos, que são frequentemente utilizados no meio florestal, caracterizam-se por um ajuste de regressão que relaciona vários diâmetros tomados ao longo do fuste e as respectivas alturas, com o DAP e a altura das árvores (SOUZA, 2007). Com destaque para o modelo do quinto grau para *Eucalyptus grandis*, conforme os trabalhos de Schneider et al. (1996), Müller (2005) e Mendonça et al. (2007); para *Pinus elliottii* conforme Drescher et al. (1999) e Souza et al. (2008a); para *Tectona grandis* conforme Favalessa et al., (2012a; 2012b); para espécies nativas Chichorro et al. (2003) e Leite et al. (2006), em que todos afirmaram que os modelos de afilamento não segmentados estimam com precisão os diâmetros comerciais para as espécies em questão.

A principal dificuldade encontrada nos modelos não segmentados é o viés significativo na estimativa dos diâmetros próximos ao solo, bem como em algumas outras partes da árvore. Porém, apresentam vantagens como a facilidade de ajuste, a fácil integração para o cálculo de volume, e a facilidade de reorganizar o modelo para o cálculo da altura comercial (KOZAK, 1988).

2.3.1.2 Modelos segmentados

O perfil do fuste também pode ser modelado se o mesmo for dividido em partes, assim, as árvores assumem um número infinito de formas o que torna difícil desenvolver uma equação simples e exata para descrever o afilamento (GROSENBAUGH, 1966). A forma de um tronco de árvore não muda abruptamente de uma forma geométrica para outra; é contínua, tal como reconhecido pelos estudiosos em afilamento como Kozak (1988) e Newnham (1988).

As dificuldades compartilhadas por muitas funções de afilamento são a existência de um elevado grau de viés na predição do diâmetro sobre algumas porções do tronco, em particular as extremidades; e a incapacidade de levar em conta as diferenças na forma do tronco entre árvores (BI, 2000). A falta de curvas de afilamento simples para traçar os vários pontos de inflexão ao longo do tronco ou os grandes erros nos ajustes

das extremidades ou ambos, juntamente com a introdução dos computadores na pesquisa florestal com disponibilidade de *softwares* apropriados, acarretaram o desenvolvimento de funções de afilamento mais complexas ora denominadas segmentadas (MUHAIRWE, 1993).

Max e Burkhart (1976) introduziram os chamados modelos de afilamento segmentados que utilizam equações separadas para descrever cada um dos vários segmentos do tronco. Na maioria dos casos, os parâmetros dos modelos segmentados são difíceis de serem estimados e esses modelos nem sempre permitem prever a altura de um determinado diâmetro ou volume (KOZAK, 1988; PEREZ et al., 1990), sendo necessário a utilização de métodos interativos.

Complementarmente, a maioria dos modelos de afilamento publicada na literatura requer vários parâmetros a serem estimados e envolvem diferentes limitações, tais como o diâmetro à 5,3 metros de altura no modelo de Clark III et al. (1991). Além disso, esses modelos vêm sendo utilizados sem verificar como os parâmetros e/ou as equações se adequam a forma do fuste (BENBRAHIM; GAVALAND, 2003).

Entre outros estudos, aqueles realizados por Cao et al. (1980), Martin (1981, 1984), Amidon (1984) e Walters e Hann (1986), Figueiredo Filho et al. (1996), Assis et al. (2001), Müller et al. (2014) e Môra (2015) demonstraram que as equações de afilamento complexas, tais como funções de afilamento segmentadas, proporcionam melhores ajustes do perfil do tronco do que os modelos de afilamento não segmentados, especialmente no volume na base do fuste.

Além de Max e Burkhart (1976), Demaerschalk e Kozak (1977), Cao et al. (1980), Parresol et al. (1987) e Clark III et al. (1991) desenvolveram outras funções segmentadas com variáveis semelhantes às que outros autores utilizaram para modelos não segmentados, variável dependente sendo a relação (d_i/d) ou $(d_i/d)^2$ e as variáveis independentes representadas pelas variáveis h_i e h , e as suas derivações e relações. Este aspecto se repete para outros autores que trabalharam com modelos não segmentados.

O modelo segmentado proposto por Clark III et al. (1991) é uma combinação dos melhores atributos dos modelos de Schlaegel e de Max e Burkhart, conseguindo explicar as diferenças de afilamento por classes de forma. Logo, apresenta estimativas de

volumes totais e parciais mais acuradas que os modelos de Max e Burkhart (1976) e Cao et al. (1980). Porém, para estimativas de alturas acima de 5,3 m são necessários processos interativos.

2.3.1.3 Modelos de forma variável

A ideia dos modelos de afilamento de forma variável, também denominados expoente variável ou expoente de forma variável, consiste em um modelo único para descrever o afilamento das árvores assim como as funções não segmentadas (KOZAK, 2004). Porém, esta descreve o afilamento do tronco como uma função contínua utilizando um expoente que varia para compensar as mudanças na forma do tronco nas diferentes seções da árvore (MÔRA, 2015).

As primeiras funções desse grupo se basearam nas funções de Forslund (1982) e Reed e Byrne (1985) usando a função simples não segmentada de Ormerod (1973) e derivadas. As funções obtidas eram simples, variáveis, não segmentadas e em função de potência para descrever a forma do perfil na base, na porção central e seções superiores. Newnham (1988) e Kozak (1988) estenderam o uso dessas funções nos modelos de forma variável ao permitir que o expoente da função de potência também fosse uma função própria de potência, criando, assim, uma forma contínua no tronco.

Essa abordagem introduzida por Newnham (1988, 1992) e Kozak (1988, 1997), de uma única função contínua como uma base e um expoente, elimina a necessidade de desenvolver funções de afilamento segmentadas para diferentes partes do fuste a fim de reduzir o viés. O expoente também pode ser especificado para mudar com o DAP e a altura das árvores para estabelecer as diferenças de forma entre elas. Em comparação com outras abordagens, tais como o sistema de Demaerschalk e Kozak (1977) e a função polinomial segmentada de Max e Burkhart (1976), esta abordagem possui menor grau de viés e maior exatidão nas previsões de afilamento (KOZAK, 1988; MUHAIRWE, 1999; NEWNHAM, 1988, 1992; PEREZ et al., 1990).

A abordagem das funções de forma variável é baseada na suposição de que a forma do fuste varia continuamente ao longo do comprimento de uma árvore (LEE et al., 2003). E os modelos, de Newnham (1988) e de Kozak (1988), incluem a razão d/h nas

suas funções, numa tentativa de descrever que a variação da forma do fuste é causada por variações no comprimento relativo da copa.

2.3.1.4 Outros modelos de afilamento e modelagens

Outras abordagens utilizadas para afilamento das árvores e descrição da forma do tronco incluem o uso de técnicas estatísticas multivariadas, equações simultâneas, funções *splines* cúbicas, modelos lineares e não lineares mistos, coordenadas polares, modelos desenvolvidos a partir de funções de crescimento (MUHAIRWE, 1993; YANG et al. 2009), componentes principais (KUBLIN et al., 2008) e modelos semi paramétricos com efeito misto (KUBLIN et al., 2013).

2.4 MODELO COM EFEITO MISTO

Em modelos lineares a suposição é de que os erros são normalmente distribuídos e isso não implica que os valores da variável resposta seguem uma distribuição normal por serem, de fato, mistura de efeitos com diferentes médias (DUARTE; VENCOVKY, 2001). Atribuir variação aleatória a diferentes fontes e ajustar modelos com efeitos aleatórios foi uma ideia tratada por Fisher (1925).

O modelo linear misto foi inicialmente proposto por Henderson (1949, 1975) para variáveis contínuas cujos resíduos são normalmente distribuídos, mas que podem não ser independentes ou não ter variância constante (HENDERSON, 1984). Estes modelos fornecem aos pesquisadores ferramentas de análise poderosas para dados agrupados ou com medidas repetidas, pois permitem o relaxamento da suposição de independência e a análise de dados com estruturas mais complexas (BROWN; PRESCOTT, 2006), como é o caso dos dados utilizados neste trabalho em que se tem medidas repetidas ao longo do tempo.

Muitos modelos estatísticos podem ser expressos como modelos lineares que incorporam efeitos fixos e aleatórios. Os efeitos dos fatores são considerados fixos quando se deseja fazer inferência somente para os níveis dos fatores experimentais incluídos no experimento, e são considerados aleatórios quando os níveis dos fatores

incluídos no experimento constituem uma amostra aleatória da população de níveis e se deseja fazer inferências para a população (PINHEIRO; BATES, 2000).

Uma das justificativas para se utilizar modelo misto é que o mesmo possibilita a predição de efeitos aleatórios na presença de efeitos fixos, suporta a análise de um grande número de problemas estatísticos como as análises de variância e regressão tradicional (PINHEIRO; BATES, 2000). Além de permitir a observação da variação dos coeficientes de regressão entre os indivíduos. O uso de modelos mistos é também adequado para dados em que a variabilidade entre os indivíduos é maior do que a variabilidade dentro do indivíduo, uma vez que o mesmo assume que a variação na resposta para todos os indivíduos segue uma mesma tendência, porém os indivíduos podem se comportar de formas diferentes (FAUSTO et al., 2009).

2.4.1 Aplicação de modelagem de efeitos mistos em funções de afilamento

Os dados necessários para ajuste de equações de afilamento são em sua maioria hierárquicos, consistem de várias medições de diâmetro e alturas no mesmo tronco em cada árvore da amostra (LEITES; ROBINSON, 2004). Assim, dentro de cada árvore, observações são susceptíveis de serem correlacionadas entre si (CAO; WANG, 2011; PINHEIRO; BATES, 2000; TASISSA; BURKHART, 1998). Desta forma, viola a suposição de independência exigida pelo método dos mínimos quadrados não lineares, resultando em estimativas tendenciosas e inconsistentes das variações dos parâmetros, embora as estimativas dos parâmetros ainda sejam imparciais (WEST et al., 1984).

Geralmente, grande parte dos pesquisadores que trabalham com modelos de afilamento utiliza a técnica de mínimos quadrados não lineares com os dados obtidos a partir de análise de tronco. No entanto, os dados da análise-tronco não são independentes e identicamente distribuídos, especialmente aqueles tomados na mesma árvore amostra (ÖZÇELİK et al., 2011). Segundo Pinheiro (1994), os modelos mistos possibilitam a modelagem de correlação intra-indivíduo, uma vez que, observações feitas no mesmo indivíduo não podem ser consideradas não correlacionadas (SCHABENBERGER; PIERCE, 2002)

Para explicar a correlação entre as observações no mesmo nível hierárquico, a utilização de modelos mistos em relação ao sítio, parcelas e parâmetros aleatórios

específicos de árvores, tem sido proposta na literatura (COSTA, 2014; NICOLETTI, 2017). Quando os modelos de efeitos fixos são ajustados a esses tipos de conjuntos de dados, estimativas da significância estatística dos parâmetros são tendenciosas (MCCULLOCH; SEARLE, 2001). Modelos de efeitos fixos resultam em piores estimativas em relação aos modelos com efeitos mistos quando o objetivo é fazer inferências sobre a população. Além disso, modelos de efeitos mistos permitem ao usuário calibrar o modelo para um sítio específico, para plantios ou árvores. Devido a isso, frequentemente se recomenda a utilização dos modelos de efeitos mistos na modelagem de crescimento e produção (MÔRA, 2015).

A modelagem não linear de efeito misto possui a vantagem de permitir a modelagem da matriz de covariâncias dos dados correlacionados. Há dois componentes na matriz de covariâncias da variável resposta: o componente de efeitos aleatórios e o componente intra-indivíduo (por exemplo, as árvores). Ambos os componentes podem ser usados para modelar heteroscedasticidade e autocorrelação de um modelo de efeitos mistos, como observado por Pinheiro e Bates (2000). O sucesso de modelos não lineares de efeitos mistos em lidar com autocorrelações para dados longitudinais foi demonstrado em outros estudos (TASSISSA; BURKHART, 1998; FANG; BAILEY, 2001; GARBER; MAGUIRE, 2003; TRINCADO; BURKHART, 2006).

A modelagem de afilamento vem sendo realizada tanto com efeitos fixos quanto efeitos mistos (CAO; WANG, 2011). Várias vantagens conferem um interesse especial para a abordagem de efeitos mistos: (i) a capacidade de levar em conta a correlação devido à estrutura de dados agrupados (várias medições numa árvore), levando à inferência imparcial, (ii) a capacidade de separar a variância total entre e dentro de árvores considerando o efeito árvores, e (iii) a possibilidade de calibrar o modelo para cada árvore (PINHEIRO; BATES, 2000).

A tendência das pesquisas não se concentra apenas no desenvolvimento de novos modelos de forma, mas também no desenvolvimento de abordagens para explicar a variabilidade observada entre árvores na forma do tronco (TRINCADO; BURKHART, 2006). A modelagem não linear de efeitos mistos para afilamento das árvores foram, e ainda são, desenvolvidos e utilizados na Engenharia Florestal (GARBER; MAGUIRE, 2003; GREGOIRE; SCHABENBERGER, 1996; LEITES; ROBINSON, 2004; MENG;

HUANG, 2009; ÖZÇELİK et al., 2011; SHARMA; PARTON, 2009; TASSISSA; BURKHART, 1998; TRINCADO; BURKHART, 2006; VALENTINE; GREGOIRE, 2001; YANG et al., 2009).

Como um dos principais objetivos do modelo de afilamento é prever diâmetros não medidos ao longo do tronco das árvores, uma característica importante, em comparação com a regressão não linear, é que os modelos de efeitos mistos permitem tanto uma resposta média (parâmetros de efeitos fixos apenas) quanto resposta calibrada (parâmetros de efeitos fixos associados aos efeitos aleatórios). Estes atributos fazem com que os modelos de efeitos mistos sejam mais eficientes quando uma previsão para nova árvore é necessária, e exista alguma informação prévia disponível. O processo de calibração pode aumentar a capacidade de predição de uma equação de afilamento (TRINCADO et al., 2007).

2.4.2 Efeito misto não-linear

Os modelos não lineares com efeitos mistos possuem parâmetros de efeitos fixos comuns a todas as árvores e parâmetros de efeitos aleatórios específicos para um critério de classificação (YANG et al., 2009). Conforme proposto por Lindstrom e Bates (1990), pode ser visto como um modelo hierárquico em que as equações de afilamento podem ser expressas da seguinte forma:

$$dib_j = f(x_j, \varphi_j) + \varepsilon_j, \quad \varepsilon_j \sim N(0, R_j)$$

onde dib_j é um vetor ($n_j \times 1$) de diâmetro observado em uma árvore j ; $f(\cdot)$ é uma função não-linear; x_j é uma matriz ($n_j \times s_1$) conhecida de co-variáveis; φ_j é um vetor ($s_1 \times 1$) de parâmetros, em que os parâmetros são de efeitos fixos ou de efeitos fixos e aleatórios; ε_j é um vetor ($n_j \times 1$) do termo de erro; R_j é uma matriz ($n_j \times n_j$) de variância-covariância definida positiva para o termo de erro.

Além disso, o vetor de parâmetros φ_j pode ser expresso como (LINDSTROM; BATES, 1990):

$$\varphi_j = A_j \beta + B_j u_j, \quad u_j \sim N(0, D)$$

onde β é um vetor ($s_1 \times 1$) de parâmetros de efeitos fixos comuns a todas as árvores; u_j é um vetor ($s_2 \times 1$) de parâmetros de efeitos aleatórios associados à árvore j , assumiu seguir uma distribuição normal multivariada com média 0 e uma matriz de variância-covariância D ; e A_j e B_j são matrizes de *design* para efeitos fixos e aleatórios, respectivamente.

As matrizes de *design* A_j e B_j geralmente envolvem, mas não necessariamente, apenas 0 e 1 como elementos (FANG; BAILEY, 2001). Uma situação comum é que alguns, mas não todos, os parâmetros possuem um componente aleatório. Nesse caso, $A_j = I$, mas B_j contém apenas algumas das colunas de A_j (LINDSTROM; BATES, 1990). Esta é a situação no presente estudo, em que A_j é uma matriz de identidade de tamanho $(s_1 \times s_1)$ e B_j é uma matriz de tamanho $(s_1 \times s_2)$, contendo apenas um subconjunto das colunas de A_j que correspondem aos parâmetros de efeitos fixos onde os parâmetros de efeitos aleatórios foram adicionados. Isso permite que alguns elementos de φ_j não tenham nenhum efeito aleatório associado. Subsequentemente:

$$d_{ij} = f(x_j, \varphi_j) + \varepsilon_j = f(x_j, \beta, u_j) + \varepsilon_j, \quad \varepsilon_j \sim N(0, R_j)$$

A combinação das matrizes de variâncias e covariâncias inerente aos efeitos fixos (R_j) e aos efeitos aleatórios (D) permite a construção de outras estruturas mais complexas, contribuindo significativamente para melhorias da explicação da variabilidade dos dados (DAVIDIAN; GILTIAN, 1995). Ao assumir a matriz de variância-covariância D para os parâmetros de efeitos aleatórios u_j como desestruturada, os efeitos da correlação entre observações de dados longitudinais podem ser contabilizados (LINDSTROM; BATES, 1990). A mesma deve ser uma matriz semidefinida positiva, e muitas vezes é suposto ser positivo-definido (PINHEIRO; BATES, 2000).

Uma vez que o modelo não linear com efeito misto foi ajustado, os parâmetros de efeitos fixos podem ser utilizados para prever uma resposta média de diâmetros em várias posições ao longo do fuste de uma árvore, com os parâmetros de efeitos aleatórios ajustados para o valor esperado de 0:

$$\hat{d}_{ij} = f(x_j, \hat{\beta}_{kj}, 0)$$

onde $\hat{\beta}_{kj}$ é o parâmetro k de efeito fixo estimado para a árvore j .

A equação de afilamento com efeito misto não-linear também pode ser usada para fazer calibrações de d_{ij} específicas da árvore ao se basear na previsão do vetor de parâmetros de efeitos aleatórios (μ_j) (YANG et al., 2009). Isso requer uma ou mais medidas anteriores do diâmetro na porção superior do fuste de uma nova árvore para

prever parâmetros de alterações secundárias utilizando um estimador Bayes aproximado (TRINCADO; BURKHART, 2006; VONESH; CHINCHILLI, 1997).

$$\hat{\mu}_j \cong \widehat{D}Z_j^T(Z_j\widehat{D}Z_j^T + \widehat{R}_j)^{-1}\widehat{e}_k$$

onde \widehat{D} é a matriz estimada de variância-covariância para os parâmetros de efeitos aleatórios μ_j ; \widehat{R}_j é a matriz de variância-covariância estimada para o termo de erro; e Z_j é a matriz de derivadas parciais em relação aos parâmetros de efeitos aleatórios $Z_j = \partial f(x_j, \beta, 0) / \partial \mu_j |_{\widehat{\beta}, 0}$.

Quando os parâmetros de efeitos aleatórios introduzem os parâmetros ϕ_j linearmente e quando a função não-linear $f(.)$ é linearizada pelo método de expansão zero, a matriz de derivadas parciais Z_j é equivalente à das derivadas parciais em relação aos parâmetros de efeitos fixos (YANG et al., 2009). Com os parâmetros de efeitos aleatórios estimados, são alcançadas calibrações específicas dos níveis de diâmetros em vários locais ao longo de um fuste (VONESH; CHINCHILLI, 1997):

$$\widehat{d}_{ij} = f(x_j, \widehat{\beta}, 0) + Z_j \mu_j$$

Uma questão-chave ao montar modelos com efeitos mistos é quais parâmetros devem ser considerados como efeitos aleatórios e quais devem ser considerados efeitos fixos (YANG et al., 2009). Uma abordagem intuitiva é obter ajustes separados para cada indivíduo, e os parâmetros com maior variabilidade devem ser preferidos como efeitos aleatórios (FANG; BAILEY, 2001). Esta abordagem requer observações suficientes em cada indivíduo para dar estimativas significativas de parâmetros nos ajustes individuais. Outra abordagem é ajustar os modelos com possíveis combinações de parâmetros de efeitos fixos e aleatórios e o *status* do parâmetro é determinado com base no modelo com o melhor ajuste (YANG et al., 2009).

2.5 OTIMIZAÇÃO

As tabelas de sortimento são elaboradas a partir de equações que descrevem a forma média do tronco de uma espécie de árvore, onde as funções de afilamento possuem as características de reproduzir os valores diamétricos situados a alturas

sucessivas. E têm sido alvo na ciência florestal com intensas pesquisas com o objetivo de alcançar a otimização da classificação e valorização dos produtos florestais, quanto a sua qualidade, dimensões e possibilidades de utilização (QUEIROZ, 2006).

A demanda pelos produtos florestais afeta o valor das florestas de maneira significativa, já que as mesmas somente possuem valor econômico se existe demanda efetiva pelos produtos que delas podem ser retirados (ARCE, 2000). Diversas indústrias possuem como parte integrante de seus processos produtivos o corte de peças para a obtenção de produtos intermediários ou finais (TEMPONI, 2007), normalmente com dimensões pré-estabelecidas que serão matérias-primas para outras atividades.

O estudo do perfil do tronco auxilia na obtenção mais precisa do volume, além de ser fundamental na determinação e na otimização dos sortimentos das árvores, influenciando no melhor aproveitamento para os diversos subprodutos. E desta forma, possibilita o planejamento e o estudo da viabilidade econômica dos povoamentos florestais (FAVALESSA et al., 2012b; FIGUEIREDO FILHO et al., 2015).

Ao planejar as intervenções nos plantios florestais, de modo a produzir um determinado conjunto de multiprodutos florestais, a precisão requerida é geralmente alta (GREGERSEN; CONTRERAS, 1980). O sortimento florestal é um dos indicadores diagnóstico na tomada de decisões referentes ao manejo florestal e é sensato supor que nenhuma árvore deveria ser cortada sem antes saber, com um nível adequado de precisão, quantos e quais tipos de produtos poderiam ser obtidos a partir dela (ARCE, 2000). Os processos com baixos rendimentos evidenciam a importância do desenvolvimento e da aplicação de modelos de otimização na conversão de toras em madeira serrada, uma vez que o melhor aproveitamento das toras só será possível com o uso de sistemas informatizados de análise, simulações e otimização no desdobro (LEITE, 1994).

O conceito de otimização envolve a oferta estratégica de quantidades limitadas de recursos entre atividades competitivas, de forma que a solução produzida seja a melhor possível (NOVAK, 2007) para atender uma determinada demanda. E para que a resolução de tais problemas de otimização seja possível, é necessário que se faça a modelagem matemática desses problemas que, dependendo de suas características,

podem ser resolvidos, entre outros, por métodos da Programação Linear, Programação Dinâmica e Programação Inteira (CARVALHO, 2010).

A Programação Linear é uma técnica da Pesquisa Operacional, utilizada para otimizar (maximizar ou minimizar) uma função linear de variáveis, chamada de função objetivo, sujeita a uma série de equações ou inequações lineares, chamadas restrições (LEUSCHNER, 1984). São essas restrições que representam as limitações dos recursos disponíveis, como capital, mão-de-obra, recursos materiais, entre outros; ou então exigências e condições que devem ser cumpridas no problema. Assim, ela engloba técnicas que visam encontrar a solução ótima de problemas, desde os mais simples aos mais complexos, com o objetivo de auxiliar o planejador na tomada de decisões (SOARES, 2002).

Os problemas de programação linear se dividem em programação linear inteira pura, programação linear inteira mista e programação linear inteira com variáveis binárias (LACHTERMACHER, 2007). Em problemas de programação linear inteira mista, certas variáveis de decisão são restritivas a valores inteiros, podendo as demais variáveis assumir valores contínuos (PIASSI, 2011), e devido à sua rigorosidade, flexibilidade e extensa capacidade de modelagem, tornar-se um dos métodos mais amplamente explorados para problemas de processos de programação (FLOUDAS, 2005). Muitos desses problemas envolvem variáveis discretas e contínuas que devem satisfazer um conjunto de restrições de igualdade e desigualdade (BARBOZA et al., 2015).

Existem muitas situações que podem ser colocados como problemas de programação linear inteira mista e a resolução para esses problemas, entendida como obtenção de uma solução ótima, pode ser difícil pela sua natureza combinatória. Considera-se que o espaço de soluções inteiras é constituído de um número finito de pontos, mesmo no caso misto. Na forma mais simples, os métodos de enumeração analisam todos os pontos exaustivamente, e esse simples método de busca exaustiva pode se tornar mais eficiente se enumerar apenas uma parte das soluções candidatas enquanto descarta pontos que não são promissores. Portanto, a eficiência de um algoritmo de busca depende de sua capacidade em descartar pontos de solução não promissores (BARBOZA et al., 2015).

Uma tendência observada é a inclusão de ferramentas de otimização em simuladores. Nessas iniciativas, observa-se a inclusão de algoritmos aproximativos ou metaheurísticas, tais como algoritmos genéticos, busca tabu, entre outros, bem como o acoplamento de ferramentas de simulação com ferramentas de otimização (BOWDEN; HALL, 1998). Apesar de diversos estudos serem publicados no sentido da automatização do acoplamento entre modelos de simulação e de otimização (MIRGHANI et al., 2005), a conjugação de modelos de simulação e de otimização também pode ser realizada de forma manual, com base em modelos construídos em aplicações distintas e com benefícios relevantes para sua justificação. Em particular, a construção de modelos independentes de otimização e de simulação permite que a equipe elaboradora avalie quais os níveis de detalhe necessários para a adequada avaliação do comportamento do sistema produtivo em relação às decisões e objetivos do estudo (CASSEL; VACCARO, 2007).

Nos trabalhos encontrados e revisados, pôde-se observar a aplicabilidade e eficiência da simulação em diversas áreas, pois, a sua utilização traz vantagens como identificação de gargalos, aumento de capacidade produtiva, redução tempo de espera, melhor aproveitamento de oportunidades, etc., além de principalmente auxiliar na tomada de decisão. Porém, é importante salientar que a simulação possui certa limitação, já que o preço de um bom modelo pode ser elevado e deverá exigir um complicado processo de desenvolvimento e os seus resultados podem ser difíceis de ser analisados, necessitando assim de profissional altamente capacitado para desempenhar determinada função (PEREIRA et al. 2015).

3. METODOLOGIA

O material utilizado para ajustar e testar o Sistema de Análise, Simulação e Otimização do Sortimento Florestal, desenvolvido no presente trabalho, foi constituído por quatro plantios florestais na região centro sul do estado de Mato Grosso com diferentes regimes de manejo. As informações de rendimentos foram comparadas com aquelas geradas através do sistema desenvolvido, em dois cenários simulados. Uma descrição detalhada dos dados utilizados é apresentada na seção 3.1.1 (pág. 58), e dos cenários na seção 3.10.5 (pág. 98).

Metodologicamente, o presente trabalho foi dividido em duas etapas: um modelo físico (seção 3.1) e um modelo econômico (seção 3.2) (Figura 1). O modelo físico foi desenvolvido para calcular e definir as dimensões das árvores para a otimização, descrever as variáveis diâmetro e volume das seções do fuste, e, posteriormente foram utilizadas como parâmetros no modelo econômico (Figura 2). Por sua vez, o modelo econômico, consistiu em um modelo de otimização prescritivo e determinístico que utiliza a programação linear inteira mista (PLIM).

Para o modelo físico, inicialmente foi realizado um estudo descritivo dos pontos de mudança da forma (PMF¹) do fuste para subsidiar a seleção da função de afilamento. O modelo a ser selecionado deveria expressar o efeito do ambiente e das práticas silviculturais que influenciam diretamente na distribuição do incremento anual de madeira ao longo do tronco das árvores, que por sua vez, influencia no volume total, na qualidade e na quantidade da madeira oriunda dos povoamentos.

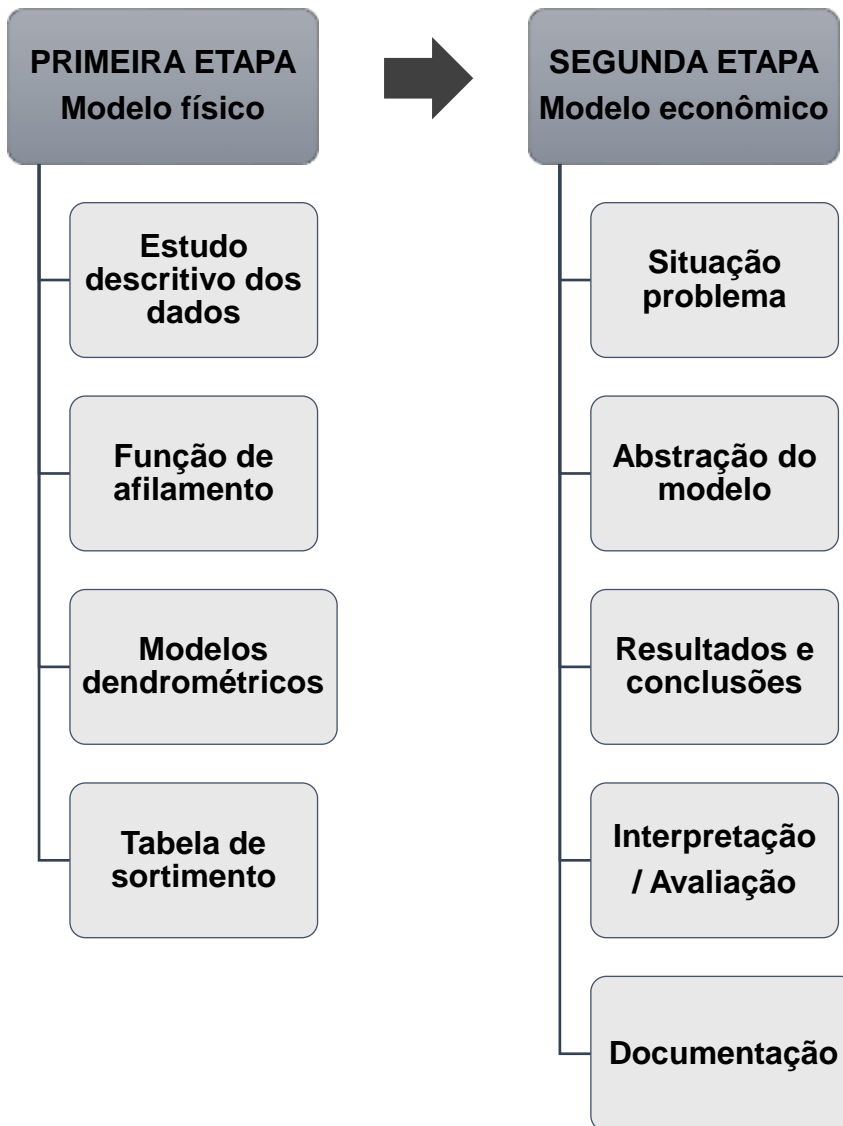
As funções de afilamento são necessárias para estimar o volume de árvores em pé para usos múltiplos, principalmente para o planejamento da produção. Para reduzir a variabilidade no ajuste dos modelos, foram efetuadas estratificações em classes de algumas das variáveis, além de modificações na estrutura do modelo selecionado, descrito no item 3.5 (pág. 66).

A modelagem das relações dendrométricas existentes entre alturas, diâmetros e volumes das árvores foi necessária para a elaboração da Tabela de sortimento, e para

¹ Ao longo deste capítulo serão utilizadas diversas siglas, cujo significado, além de se encontrar no corpo de texto na primeira ocorrência de cada uma delas, pode ser encontrado na Lista de Abreviações e Siglas.

implementação do modelo econômico, a segunda etapa do trabalho. Considerando-se que, quando a altura da árvore varia, essa variação resulta em diferentes diâmetros e volumes, conseqüentemente vai variar a dimensão das seções.

Figura 1 – Etapas para o estudo do afilamento e desenvolvimento de um sistema de análise, simulação e otimização do sortimento de *Tectona grandis* L.f.

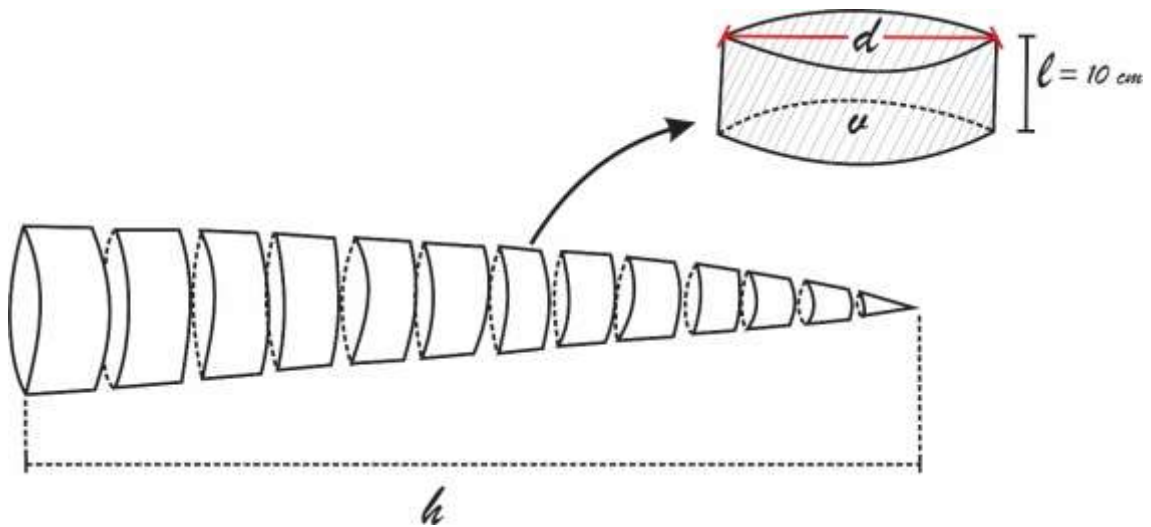


Fonte: o autor.

Para a implementação de um sistema de análise, simulação e otimização do sortimento é necessário dispor de informações que podem não ter sido obtidas

previamente em campo, ou então, informações discriminadas por classes de diâmetros e classes de altura, uma vez que duas árvores podem ter o mesmo diâmetro e diferir em suas alturas, e vice-versa. Foram desenvolvidos módulos complementar para estimar as variáveis independentes exigidas pelo modelo de Clark III et al. (1991).

Figura 2 – Representação gráfica dos parâmetros do modelo econômico e as variáveis do modelo físico para seccionamento e determinação dos respectivos volumes



em que: d – diâmetro, em cm; l – comprimento da seção; u – volume da seção em m^3 , corresponde à parte rachurada; h – altura da árvore, em metros.

Fonte: o autor.

Para o modelo econômico é necessária a apresentação da situação atual (entrada). Neste estudo, o problema genérico adotado foi que, podem existir múltiplos usos em um único fuste, com valores diferenciados, enquanto, ao se trabalhar em função do volume total se dilui o valor de produtos diferenciados para um único produto, o que normalmente é menos valorado.

Ainda é necessário que o modelo econômico realize as análises de formas particulares e independentes para resultar em uma solução ótima e exata para cada árvore. Para atender a esta abstração, o sistema real foi composto de funções lineares com um conjunto de entradas conhecidas, para resultar um único conjunto de saídas, reduzindo a complexidade do modelo econômico e a sua aplicação.

Esta segunda etapa é para gerar cenários de acordo com a função objetivo do modelo, podendo esta ser de maximização ou minimização da solução ótima. A partir dos relatórios gerados, o produtor florestal poderá obter resultados robustos de como aplicar o traçamento da tora e obter os sortimentos para a máxima renda ou máximo volume do povoamento.

3.1 ÁREA DE ESTUDO E DADOS

O estudo foi realizado com dados de plantios florestais de *Tectona grandis* L. f. de quatro localidades distintas, no estado do Mato Grosso, Brasil (Figura 3). Segundo a classificação de Köppen-Geiger, o clima da região é do tipo Aw, tropical com estação seca, com variação da temperatura média entre 22° e 24°C (ALVARES et al., 2013).

O povoamento da Fazenda Aguaçu, está situado na Serra de São Vicente, município de Cuiabá, estado de Mato Grosso, circunscrita à coordenada 15°37'16"S e 55°33'11"W, com área efetiva de plantio de 118,49 hectares. O povoamento foi implantado em 2001 com espaçamento 3 m x 2 m; as cubagens foram realizadas com 12 anos de idade (Tabela 1).

Tabela 1 – Resumo das informações povoamentos de *Tectona grandis* L.f. utilizados para estudo da forma do tronco e avaliação da renda dos sortimentos, região centro-sul, estado do Mato Grosso, 2018

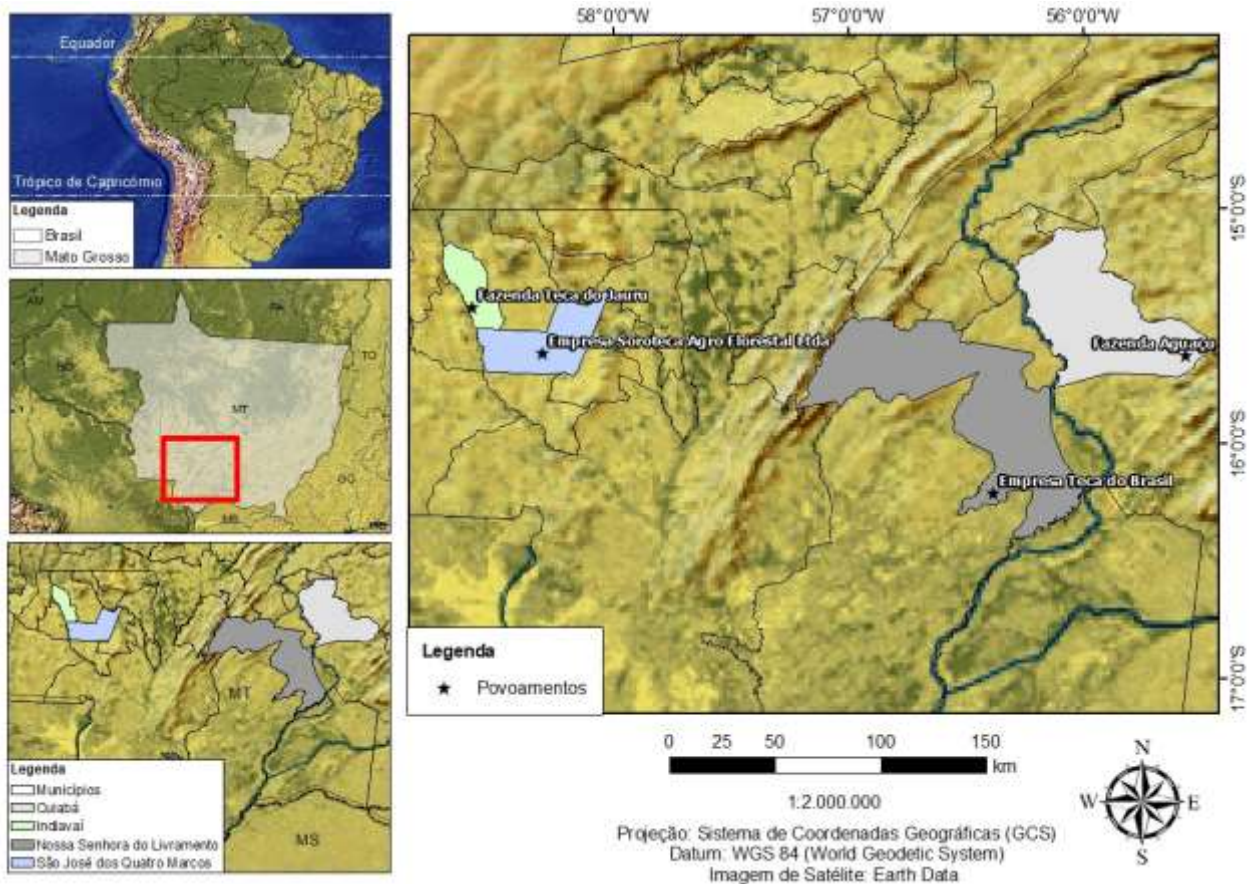
Fazenda	Área total (ha)	Idade dos Povoamentos (anos)	Tamanho da unidade amostral (m ²)	Espaçamento (m ²)	Árvores cubadas
Aguaçu	118,49	12	600	3,0 x 2,0	52
Soroteca	60,00	8	900	3,0 x 3,0	63
Teca do Brasil	1.260,00	9 a 16	450	3,0 x 3,0	224
Teca do Jauru	6,75	36	1000	1,5 x 2,0	31
Total					370

Fonte: o autor.

Os povoamentos da empresa Soroteca Agroflorestal Ltda. estão localizados no município de São José dos Quatro Marcos, sudoeste do estado de Mato Grosso, circunscrito à coordenada 15°37'S e 58°18'W. O povoamento foi implantado em 1990,

com área total de 60 hectares e espaçamento 3 m x 3 m, as cubagens foram realizadas com 8 anos.

Figura 3 – Localização dos povoamentos de *Tectona grandis* L.f. utilizados para estudo da forma do tronco e avaliação da renda dos sortimentos, região centro-sul, estado do Mato Grosso, 2018



Fonte: o autor.

Os povoamentos da empresa Teca do Brasil estão localizados no município de Nossa Senhora do Livramento, centro-sul do estado de Mato Grosso, circunscrito à coordenada $16^{\circ}12'32''S$ e $56^{\circ}22'57''W$. Os mesmos foram implantados entre os anos de 1999 e 2003, em uma área total de 1.260 hectares com espaçamento 3 m x 3 m, e as cubagens foram realizadas nas idades 9 a 16 anos.

O povoamento da fazenda Teca do Jauru de propriedade da empresa Cáceres Florestal Ltda. está situado no município de Indiavaí, sudoeste do estado de Mato Grosso,

circunscrito à coordenada geográfica 15°25'14,86''S e 58°37'0,87''W. O plantio foi realizado em 1979, perfazendo uma área total de 6,75 ha com espaçamento de 1,5 m x 2,0 m. Ao total, foram feitas cinco operações de desbaste e as árvores da cubagem são resultantes do corte raso aos 36 anos.

Para cada parcela em que as árvores foram cubadas, dispunham-se de informações sobre o solo, clima, área da parcela, médias de diâmetro à altura do peito (DAP) e altura total, histórico de desbastes, tratamentos silviculturais, espaço médio das árvores e índice de espaçamento relativo.

A cubagem foi realizada em 370 árvores com diferentes posições de altura de medição. O comprimento entre as seções variou de um a três metros, mas para todas as árvores foi verificada a constância na posição de 1,3 m de altura e pelo menos duas medições abaixo desta. No entanto, os diferentes comprimentos de seções não afetaram a acuracidade dos modelos, como já constatado por Kozak (1988) para seções de até três metros antes ou depois dos pontos de inflexão.

De todas as árvores (j), foram mensurados os diâmetros nas posições i (d_{ij}) em várias alturas (h_{ij}), o diâmetro a 1,30 m do solo (d_j) e a altura (h_j). A obtenção do volume real, tanto total como parcial, em cada porção, foi obtida somando os volumes parciais de todas as seções através do procedimento de *Smalian*.

A altura dominante foi calculada considerando o conceito de Assmann (1970) que define essa altura como altura média das cem árvores de maiores diâmetros em um hectare. Em virtude de as unidades amostrais dos povoamentos serem inferiores à um hectare (Tabela 1), foi realizada uma proporção para definir quantas árvores seriam selecionadas. Por exemplo, para a Fazenda Aguaçu, 600 m², foram selecionadas as seis árvores de maior diâmetro em cada parcela.

3.1.1 Base de dados do ajuste

As árvores cubadas foram distribuídas em dez classes de DAP e, quando disponível, aleatoriamente, vinte árvores em cada classe foram selecionadas para compor a base de dados do ajuste (Tabela 2). No cálculo da intensidade ideal de amostragem por classe diamétrica considerou a população de estudo infinita, com limite

máximo de erro admissível de 10% para média a uma probabilidade de confiança de 95% (PÉLLICO NETTO; BRENA, 1997).

$$n = \frac{t^2 s_x^2}{E^2}$$

em que: n – intensidade ideal de amostragem, em número de árvores; t – valor da estatística t de Student, $t_{(n-1,95\%)}$; s_x^2 – estimativa da variância em $m^3/\text{árvore}$; E – limite de erro máximo admissível em $m^3/\text{árvore}$.

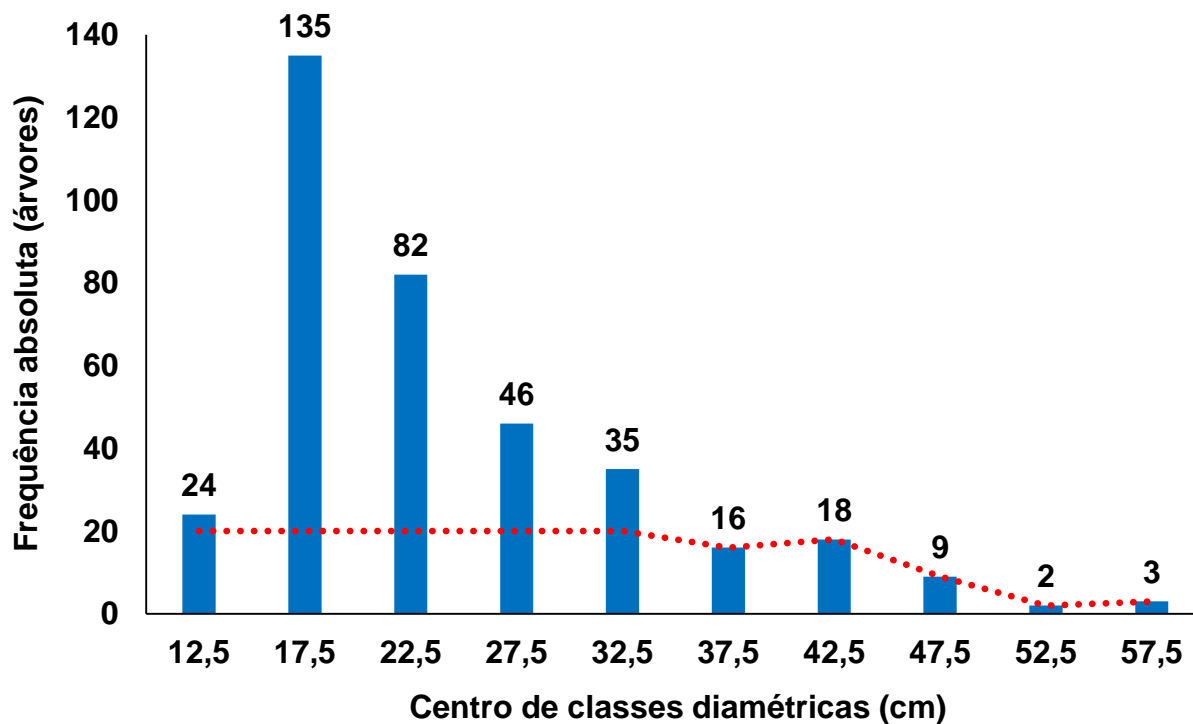
Tabela 2 – Frequência das árvores de *Tectona grandis* L.f. cubadas em diferentes classes de diâmetro, região centro-sul do estado de Mato Grosso, MT

Classe	Classe de diâmetro à altura do peito (DAP – cm)			n	Frequência absoluta (árvores)
	Limite inferior	Centro de classe	Limite superior		
1	10,00	12,50	14,99	33	20
2	15,00	17,50	19,99	3	20
3	20,00	22,50	24,99	9	20
4	25,00	27,50	29,99	2	20
5	30,00	32,50	34,99	10	20
6	35,00	37,50	39,99	12	16
7	40,00	42,50	44,99	9	18
8	45,00	47,50	49,99	5	9
9	50,00	52,50	54,99	4	2
10	55,00	57,50	59,99	27	3
SOMA					148

em que: n – intensidade ideal de amostragem.
Fonte: o autor.

Mesmo não atendendo à intensidade amostral em todas as classes diamétricas, segundo Kozak (1988), as estimativas dos parâmetros das equações de afilamento são simples e podem ser estimados com qualquer programa de regressão múltipla com cerca de 60 a 100 árvores. Ainda assim, buscou-se estabelecer uma distribuição retangular das frequências nas classes de DAP com vinte árvores nas primeiras cinco classes e nas demais a quantidade de árvores disponível (Figura 4). Esse procedimento é justificado pela coincidência da média e do centro de cada classe, o que implica no desaparecimento do erro de arredondamento (PRODAN et al., 1997).

Figura 4 – Distribuição diamétrica da base de dados e frequência amostrada (linha vermelha tracejada) para o ajuste dos modelos de afilamento para *Tectona grandis* L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso



Fonte: o autor.

A análise descritiva dos dados permitiu conhecer a média e dispersão dos dados amostrados (Tabela 3), destacando-se o alto desvio-padrão dos diâmetros (d e d_i).

Tabela 3 – Análise descritiva das 148 árvores que compõem a base de dados do ajuste de funções de afilamento para *Tectona grandis* L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso

Variável	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)	Mínimo	Máximo
d	28,68	11,48	40,0	11,14	57,50
d_i	19,92	12,85	64,5	0,80	84,00
h	21,1	4,8	22,7	11,1	31,5
h_i	9,5	7,2	75,8	0,1	29,5

em que: d – diâmetro à altura do peito, em cm; d_i – diâmetro na posição i , em cm; h – altura, em m; h_i – altura na posição i , em m.

Fonte: o autor.

3.2 ESTUDO DOS PONTOS DE MUDANÇA DE FORMA DO FUSTE

O modelo de Schöepfer (1966) caracterizado pelo polinômio não segmentado do 5° grau foi testado no estudo dos pontos de mudança de forma (PMF) no fuste. O ponto onde acontece a mudança na forma da figura geométrica ocorre onde a curva que descreve o perfil do fuste muda de concavidade, isto é, o ponto de inflexão da curva, matematicamente obtido a partir da segunda derivada da função igualada a zero.

No caso dos modelos polinomiais segmentados, cada segmento é considerado para descrever uma forma, logo, quando aplicado as derivadas na função, o início/fim de cada segmento poderá coincidir com os pontos de máxima e mínimo das curvas.

Foi utilizado o Wolfram Alpha LLC ©2018 para o cálculo das primeiras e segundas derivadas da função de Schöepfer (1966), a partir destas foram conhecidos os PMF's para cada árvore selecionada.

3.3 PROCESSAMENTO DE DADOS

Todo o processamento dos dados foi realizado por meio do sistema estatístico SAS – *Statistical Analysis System* – versão 9.3 (SAS Institute Inc., 2016) empregando os procedimentos *proc nlin*, *proc reg*, *proc model* e *proc nlmixed*. Os recálculos das estatísticas de precisão e ajuste, assim como os gráficos de dispersão, ajuste e frequência, foram realizados em planilhas eletrônicas do *Microsoft Excel*®.

O teste *t* de Student foi utilizado para avaliar a significância dos coeficientes das equações, testando a hipótese nula do coeficiente ser igual a zero, a 5% de significância. Para os modelos de afilamento, quando apenas um dos coeficientes das equações teve resultado não significativo, ou seja, foram estatisticamente iguais a zero, foi proposta a modificação do modelo retirando esse coeficiente não significativo. As equações que permaneceram com coeficiente não significativo, ou apresentaram mais de um coeficiente não significativo, foram desconsideradas para a continuidade do estudo.

As equações de relação hipsométrica e diâmetros relativos que apresentaram coeficientes angulares não significativos foram desconsideradas para a continuidade do estudo.

No ajuste dos modelos de afilamento a variável diâmetro (d_{ij}) foi isolada, como proposto por Môra et al. (2014) para os modelos de Demaerschalk (1972), Kozak et al. (1969), Baldwin Junior e Feduccia (1991) e Ormerod (1973). Desta maneira, as estimativas da variável d_{ij} calculadas pela regressão não linear em função de d_j são mais exatas do que as obtidas com o modelo ajustado na forma original (d_{ij}/d_j) ou $((d_{ij}/d_j)^2)$.

No ajuste do modelo de Clark III et al. (1991) foi necessária a medição do diâmetro com casca (cm) à altura de 5,3 m ($d_{5,3j}$). Para as árvores que não possuíam a medição a 5,3 m foi utilizada a interpolação linear para a estimativa desses diâmetros.

3.4 MODELOS DE AFILAMENTO

Para o ajuste das funções de afilamento foi empregado o procedimento *proc nlim* e o algoritmo de Marquardt para minimizar a soma de quadrado dos resíduos.

No estudo foram utilizados modelos de afilamento não segmentados, segmentados e de forma variável. As expressões matemáticas correspondentes a cada uma das funções de afilamento utilizaram as notações para as variáveis: d_j = diâmetro à altura do peito com casca (cm) medido em cada árvore j ; h_j = altura (m) em cada árvore j ; h_{ij} = altura (m) da base do fuste até o ponto onde se alcança o diâmetro d_{ij} em cada árvore j ; d_{ij} = diâmetro (cm) com casca a uma altura h_i em cada árvore j ; $d_{5,3j}$ = diâmetro com casca mensurado (cm) à altura de 5,3 m em cada árvore j ; $Z_{ij} = [(h_j - h_{ij})/h_j]$; $X_{ij} = [(h_j - h_{ij})/(h_j - 1,30)]$; $T_{ij} = h_{ij}/h_j$; $Z_{0j} = [(h_j - 1,30)/h_j]$; $s_j = [1+(h_j/d_j)]$; $K = (\pi/40000)$; β_i = parâmetros médios a serem estimados no ajuste do conjunto de dados; α_i = pontos de inflexão estimados nos modelos segmentados; ε_{ij} = erro aleatório; e $p = (h_k/h_j)$, em que h_k é a altura no fuste correspondente ao ponto de inflexão onde a curva muda a forma de neiloide para paraboloides (NEWNHAM, 1992).

Os modelos não segmentados, segmentados e de forma variável testados para descrever o perfil do fuste de *Tectona grandis* neste estudo foram separados por autor,

ano da publicação e sua expressão (Tabela 4). Esses modelos podem ser classificados em modelos polinomiais simples, modelos exponenciais, modelos potenciais e modelos trigonométricos.

Tabela 4 – Funções de afilamento não segmentadas, segmentadas e de forma variável utilizadas para o ajuste de dados de *Tectona grandis* L.f., em região centro-sul do estado de Mato Grosso

FUNÇÕES NÃO SEGMENTADAS	
Schöepfer (1966) – Polinômio do 5º Grau	$\frac{d_{ij}}{d_j} = \beta_0 + \beta_1 T_{ij} + \beta_2 T_{ij}^2 + \beta_3 T_{ij}^3 + \beta_4 T_{ij}^4 + \beta_5 T_{ij}^5 + \varepsilon_{ij}$
Kozak <i>et al.</i> (a) (1969)	$\left(\frac{d_{ij}}{d_j}\right)^2 = \beta_1(T_{ij} - 1) + \beta_2(T_{ij}^2 - 1) + \varepsilon_{ij}$
Kozak <i>et al.</i> (b) (1969)	$\left(\frac{d_{ij}}{d_j}\right)^2 = \beta_1(1 - 2T_{ij} + T_{ij}^2) + \varepsilon_{ij}$
Kozak <i>et al.</i> (c) (1969)	$\left(\frac{d_{ij}}{d_j}\right)^2 = \beta_0 + \beta_1 T_{ij} + \beta_2 T_{ij}^2 + \varepsilon_{ij}$
Demaerschalk (1972)	$\left(\frac{d_{ij}}{d_j}\right)^2 = 10^{2\beta_0} d_j^{2\beta_1 - 2} (h_j - h_{ij})^{2\beta_2} h_j^{2\beta_3} + \varepsilon_{ij}$
Demaerschalk (a) (1973)	$\left(\frac{d_{ij}}{d_j}\right)^2 = \beta_0 [(h_j - h_{ij})/h_j]^{\beta_1} + \varepsilon_{ij}$
Demaerschalk (b) (1973)	$\left(\frac{d_{ij}}{d_j}\right)^2 = \beta_0 \left[\frac{(h - h_{ij})^{\beta_1}}{\beta_2 h_j^{\beta_1 + 1} + \beta_3 h_j^{\beta_1}} \right] + \varepsilon_{ij}$
Demaerschalk (c) (1973)	$\left(\frac{d_{ij}}{d_j}\right)^2 = \beta_0 \left(\frac{1}{d^2 h_j} \right) \left(\frac{h_j - h_{ij}}{h_j} \right)^{\beta_1} + \beta_2 \left(\frac{h_j - h_{ij}}{h_j} \right)^{\beta_3} + \varepsilon_{ij}$
Demaerschalk (d) (1973)	$\left(\frac{d_{ij}}{d_j}\right)^2 = \beta_0 \left[\frac{(h_j - h_{ij})^{\beta_1}}{h_j^{\beta_1 + 1}} \right] + \beta_2 \left[\frac{(h_j - h_{ij})^{\beta_3}}{h_j} \right] + \beta_4 \left[\frac{(h_j - h_{ij})^{\beta_5}}{h_j^{\beta_5 - 1}} \right] + \varepsilon_{ij}$
Demaerschalk (e) (1973)	$\left(\frac{d_{ij}}{d_j}\right)^2 = \beta_0 \left[\frac{(h_j - h_{ij})^{\beta_1}}{h_j^{\beta_1 + 1}} \right] + \beta_2 \left[\frac{(h_j - h_{ij})^{\beta_3}}{h_j} \right] + \varepsilon_{ij}$
Ormerod (1973)	$\frac{d_{ij}}{d_j} = \left(\frac{h_j - h_{ij}}{h_j - 1,3} \right)^{\beta_1} + \varepsilon_{ij}$

(Continua)

Tabela 4 – Funções de afilamento não segmentadas, segmentadas e de forma variável utilizadas para o ajuste de dados de *Tectona grandis* L.f., em região centro-sul do estado de Mato Grosso

(Continuação)

FUNÇÕES SEGMENTADAS	
Max e Burkhart (1976)	$\left(\frac{d_{ij}}{d_j}\right)^2 = \beta_1(T_{ij} - 1) + \beta_2(T_{ij}^2 - 1) + \beta_3(\alpha_1 - T_{ij})^2 I_1 + \beta_4(\alpha_2 - T_{ij})^2 I_2 + \varepsilon_{ij}$ $I_1 = \begin{cases} 1 & \text{se } T_{ij} \leq \alpha_1 \\ 0 & \text{se } T_{ij} > \alpha_1 \end{cases} \quad I_2 = \begin{cases} 1 & \text{se } T_{ij} \leq \alpha_2 \\ 0 & \text{se } T_{ij} > \alpha_2 \end{cases}$
Cao et al. (1980) (reescrita por Byrne e Reed (1986))	$\left(\frac{d_{ij}}{d_j}\right)^2 = \left(\frac{\beta_0}{K}\right) [2Z_{ij} + \beta_1(3Z_{ij}^2 - 2Z_{ij}) + \beta_2(Z_{ij} - \alpha_1)^2 I_1 + \beta_3(Z_{ij} - \alpha_2)^2 I_2] + \varepsilon_{ij}$ $I_1 = \begin{cases} 1 & \text{se } Z_{ij} \geq \alpha_1 \\ 0 & \text{se } Z_{ij} < \alpha_1 \end{cases} \quad I_2 = \begin{cases} 1 & \text{se } Z_{ij} \geq \alpha_2 \\ 0 & \text{se } Z_{ij} < \alpha_2 \end{cases}$
Parresol et al. (1987)	$\left(\frac{d_{ij}}{d_j}\right)^2 = Z_{ij}^2(\beta_1 + \beta_2 Z_{ij}) + (Z_{ij} - \alpha)^2[\beta_3 + \beta_4(Z_{ij} + 2\alpha)]I + \varepsilon_{ij}$ $I = \begin{cases} 1 & \text{se } Z_{ij} \geq \alpha \\ 0 & \text{se } Z_{ij} < \alpha \end{cases}$
Clark III et al. (1991)	$d_{ij} = \left\{ \begin{array}{l} IS * d_j^2 \left\{ 1 + \left(\beta_2 + \frac{\beta_3}{d_j^3} \right) * \frac{\left[\left(1 - \frac{h_{ij}}{h_j}\right)^{\beta_0} - \left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_0} \right]}{1 - \left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_0}} \right\} + \\ IB * \left\{ d_j^2 - (d_j^2 - d_{5,3j}^3) * \frac{\left[\left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_1} - \left(1 - \frac{h_{ij}}{h_j}\right)^{\beta_1} \right]}{\left[\left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_1} - \left(1 - \frac{5,3}{h_j}\right)^{\beta_1} \right]} \right\} + \\ IT * \left\{ d_{5,3j}^2 * \left[\beta_5 * \left(\frac{h_{ij} - 5,3}{h_j - 5,3} - 1 \right)^2 \right] + \right. \\ \left. IM * \left[\frac{1 - \beta_5}{\beta_4^2} * \left(\beta_4 - \frac{h_{ij} - 5,3}{h_j - 5,3} \right)^2 \right] \right\} \right\} + \varepsilon_{ij}$ $I_S = \begin{cases} 1 & \text{se } h_{ij} < 1,3 \\ 0 & \text{outros casos} \end{cases} \quad I_B = \begin{cases} 1 & \text{se } 1,3 \leq h_{ij} \leq 5,3 \\ 0 & \text{outros casos} \end{cases} \quad I_T = \begin{cases} 1 & \text{se } h_{ij} > 5,3 \\ 0 & \text{outros casos} \end{cases} \quad I_M = \begin{cases} 1 & \text{se } h_{ij} < (5,3 + \beta_4(h_j - 5,3)) \\ 0 & \text{outros casos} \end{cases}$

(Continua)

Tabela 4 – Funções de afilamento não segmentadas, segmentadas e de forma variável utilizadas para o ajuste de dados de *Tectona grandis* L.f., em região centro-sul do estado de Mato Grosso

(Continuação)	
FUNÇÕES DE FORMA VARIÁVEL	
Kozak (1988)	$d_{ij} = \beta_0 d_j^{\beta_1} \beta_2^{d_i} \left(\frac{1 - \sqrt{T_{ij}}}{1 - \sqrt{p}} \right) \left[\beta_3 T_{ij}^2 + \beta_4 \ln(T_{ij} + 0,001) + \beta_5 \sqrt{T_{ij}} + \beta_6 \exp(T_{ij}) + \beta_7 \left(\frac{d_j}{h_j} \right) \right] + \varepsilon_{ij}$
Bi (2000)	$\frac{d_{ij}}{d_j} = \left[\left(\frac{\log \sin \left(\frac{\pi}{2} T_{ij} \right)}{\log \sin \left(\frac{\pi}{2} \frac{1,3}{h_j} \right)} \right)^{\beta_0 + \beta_1 \sin \left(\frac{\pi}{2} T_{ij} \right) + \beta_2 \cos \left(\frac{3\pi}{2} T_{ij} \right) + \beta_3 \sin \left(\frac{\pi}{2} T_{ij} \right) / T_{ij} + \beta_4 d_j + \beta_5 T_{ij} \sqrt{d_j} + \beta_6 T_{ij} \sqrt{h_j}} \right]$
Lee <i>et al.</i> (2003)	$d_{ij} = \beta_0 d_j^{\beta_1} (1 - T_{ij})^{\beta_2 T_{ij}^2 + \beta_3 T_{ij} + \beta_4} + \varepsilon_{ij}$
Kozak (a) (2004)	$d_{ij} = \beta_0 d_j^{\beta_1} \left(\frac{1 - T_{ij}^{\frac{1}{4}}}{1 - p^{\frac{1}{4}}} \right)^{\beta_2 + \beta_3 (1/e^{d_j/h_j}) + \beta_4 d_j} \left(\frac{1 - T_{ij}^{1/4}}{1 - p^{1/4}} \right) + \beta_5 \left(\frac{1 - T_{ij}^{1/4}}{1 - p^{1/4}} \right)^{\frac{d_j}{h_j}} + \varepsilon_{ij}$
Kozak (b) (2004)	$\frac{d_{ij}}{d_j} = \beta_0 d_j^{\beta_1} h_j^{\beta_2} \left(\frac{1 - T_{ij}^{\frac{1}{3}}}{1 - p^{\frac{1}{3}}} \right) \left[\beta_3 T_{ij}^4 + \beta_4 (1/e^{d_j/h_j}) + \beta_5 \left(\frac{1 - T_{ij}^{\frac{1}{3}}}{1 - p^{\frac{1}{3}}} \right)^{0,1} + \beta_6 (1/d_j) + \beta_7 h_j^{1 - T_{ij}^{\frac{1}{3}}} + \beta_8 \left(\frac{1 - T_{ij}^{\frac{1}{3}}}{1 - p^{\frac{1}{3}}} \right) \right]$

em que: d_j = diâmetro à altura do peito com casca (cm) medido em cada árvore j ; h_j = altura (m) em cada árvore j ; h_{ij} = altura (m) da base do fuste até o ponto onde se alcança o diâmetro d_{ij} em cada árvore j ; d_{ij} = diâmetro (cm) com casca a uma altura h_{ij} em cada árvore j ; $d_{5,3j}$ = diâmetro com casca mensurado (cm) à altura de 5,3 m em cada árvore j ; $Z_{ij} = [(h_j - h_{ij})/h_j]$; $X_{ij} = [(h_j - h_{ij})/(h_j - 1,30)]$; $T_{ij} = h_{ij}/h_j$; $Z_{0j} = [(h_j - 1,30)/h_j]$; $s_j = [1 + (h_j/d_j)]$; $K = (\pi/40000)$; β_i = parâmetros médios a serem estimados no ajuste do conjunto de dados; α_i = pontos de inflexão estimados nos modelos segmentados; ε_{ij} = erro aleatório; e $p = (h_k/h_j)$, em que h_k é a altura no fuste correspondente ao ponto de inflexão onde a curva muda a forma de neiloide para paraboloide (NEWNHAM, 1992).

Fonte: Adaptado de Môra (2015).

3.5 ESTRATIFICAÇÃO DOS DADOS E ALTERAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO MODELO

3.5.1 Classes de estratificação

Após a seleção do melhor modelo para descrever o afilamento foram propostas estratificações por classe de DAP, por classe de parâmetro de forma “ r ” e por classe de fator de forma artificial das árvores (Tabela 5), com a finalidade de se obter estimativas mais precisas dos diâmetros. As classes de diâmetros, com intervalo de 5 cm, foram construídas a partir da inclusão do menor até o maior diâmetro observado. As classes de forma foram definidas a partir dos valores calculados para o parâmetro “ r ” e, para valores de fator forma artificial foi considerada a razão do volume da árvore com o volume do cilindro com diâmetro que corresponde ao DAP.

Tabela 5 – Estratificações propostas por classe de diâmetro à altura do peito, por classe de parâmetro “ r ” e por classe de fator de forma artificial para as árvores de *Tectona grandis* L.f. cubadas na região centro-sul do estado de Mato Grosso, MT

Classe	Classe de diâmetro à altura do peito (DAP – cm)			Frequência absoluta (árvores)
	Limite inferior	Centro de classe	Limite superior	
1	10,00	12,50	14,99	20
2	15,00	17,50	19,99	20
3	20,00	22,50	24,99	20
4	25,00	27,50	29,99	20
5	30,00	32,50	34,99	20
6	35,00	37,50	39,99	16
7	40,00	42,50	44,99	18
8	45,00	47,50	49,99	9
9	50,00	52,50	54,99	2
10	55,00	57,50	59,99	3
Classe	Parâmetro “ r ”			Frequência absoluta (árvores)
	Limite inferior	Centro de classe	Limite superior	
1	0,30	0,55	0,79	85
2	0,80	1,05	1,29	45
3	1,30	1,55	1,80	18
Classe	Fator de forma artificial ($f_{1,3}$)			Frequência absoluta (árvores)
	Limite inferior	Centro de classe	Limite superior	
1	0,30	0,34	0,37	32
2	0,38	0,42	0,45	100
3	0,46	0,50	0,54	16

Fonte: o autor.

O parâmetro de forma “ r ” foi expresso pela função $g_w = p * w^r$, sendo g_w a área basal do tronco a uma distância w da extremidade da copa e p o parâmetro que descreve o tamanho do corpo de rotação. Para os valores do expoente de forma “ r ” são gerados diferentes sólidos de revolução: quando “ r ” é 0, a forma assemelha-se ao cilindro; “ r ” igual a 1, parábola quadrática; “ r ” igual a 2, cone; e quando o “ r ” é igual a 3, neiloide (FINGER, 1992).

Todas as classificações abrangem a amplitude dos dados, e para as variáveis parâmetro “ r ” e fator de forma artificial foram definidas três classes equitativas para manter a frequência mínima de dez árvores por classe.

3.5.2 Modificações propostas ao modelo de Clark III et al. (1991)

Considerando o resultado da estratificação, duas abordagens foram propostas ao modelo de Clark III et al. (1991). Na primeira modificação, foi proposta a retirada do componente β_3/d_j^3 do modelo, e para a segunda modificação o componente $\beta_2 + \beta_3/d_j^3$ (Tabela 6). Outros autores também verificaram a não significância do coeficiente β_3 e sugeriram modificações semelhantes (JIANG et al. 2005).

Tabela 6 – Modificações propostas ao modelo de Clark III et al. (1991) para o ajuste de dados de *Tectona grandis* L.f., em região centro-sul do estado de Mato Grosso

$$d_{ij} = \left\{ \begin{array}{l} IS * d_j^2 \left\{ 1 + \left(\beta_2 + \frac{\beta_3}{d_j^3} \right) * \left[\frac{\left(1 - \frac{h_{ij}}{h_j}\right)^{\beta_0} - \left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_0}}{1 - \left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_0}} \right] \right\} + \\ IB * \left\{ d_j^2 - (d_j^2 - d_{5,3j}^2) * \left[\frac{\left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_1} - \left(1 - \frac{h_{ij}}{h_j}\right)^{\beta_1}}{\left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_1} - \left(1 - \frac{5,3}{h_j}\right)^{\beta_1}} \right] \right\} + \\ IT * \left\{ \begin{array}{l} d_{5,3j}^2 * \left[\beta_5 * \left(\frac{h_{ij} - 5,3}{h_j - 5,3} - 1 \right)^2 \right] + \\ IM * \left[\frac{1 - \beta_5}{\beta_4^2} * \left(\beta_4 - \frac{h_{ij} - 5,3}{h_j - 5,3} \right)^2 \right] \end{array} \right\} \end{array} \right\} + \varepsilon_{ij}$$

Clark III et al.
(1991)

(Continua)

Tabela 6 – Modificações propostas ao modelo de Clark III et al. (1991) para o ajuste de dados de *Tectona grandis* L.f., em região centro-sul do estado de Mato Grosso

(Continuação)

$$\begin{aligned}
 1 \quad d_{ij} &= \left\{ \begin{aligned} &IS * d_j^2 \left\{ 1 + (\beta_2) * \left[\frac{\left(1 - \frac{h_{ij}}{h_j}\right)^{\beta_0} - \left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_0}}{1 - \left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_0}} \right] \right\} + \\ &IB * \left\{ d_j^2 - (d_j^2 - d_{5,3j}^2) * \left[\frac{\left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_1} - \left(1 - \frac{h_{ij}}{h_j}\right)^{\beta_1}}{\left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_1} - \left(1 - \frac{5,3}{h_j}\right)^{\beta_1}} \right] \right\} + \\ &IT * \left\{ d_{5,3j}^2 * \left[\beta_5 * \left(\frac{h_{ij} - 5,3}{h_j - 5,3} - 1 \right)^2 \right] + \right. \\ &\quad \left. IM * \left[\frac{1 - \beta_5}{\beta_4^2} * \left(\beta_4 - \frac{h_{ij} - 5,3}{h_j - 5,3} \right)^2 \right] \right\} \end{aligned} \right\} + \varepsilon_{ij} \\
 2 \quad d_{ij} &= \left\{ \begin{aligned} &IS * d_j^2 \left\{ 1 * \left[\frac{\left(1 - \frac{h_{ij}}{h_j}\right)^{\beta_0} - \left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_0}}{1 - \left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_0}} \right] \right\} + \\ &IB * \left\{ d_j^2 - (d_j^2 - d_{5,3j}^2) * \left[\frac{\left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_1} - \left(1 - \frac{h_{ij}}{h_j}\right)^{\beta_1}}{\left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_1} - \left(1 - \frac{5,3}{h_j}\right)^{\beta_1}} \right] \right\} + \\ &IT * \left\{ d_{5,3j}^2 * \left[\beta_5 * \left(\frac{h_{ij} - 5,3}{h_j - 5,3} - 1 \right)^2 \right] + \right. \\ &\quad \left. IM * \left[\frac{1 - \beta_5}{\beta_4^2} * \left(\beta_4 - \frac{h_{ij} - 5,3}{h_j - 5,3} \right)^2 \right] \right\} \end{aligned} \right\} + \varepsilon_{ij} \\
 3 \quad d_{ij} &= \left\{ \begin{aligned} &IS * d_j^2 \left\{ 1 + \left(\beta_2 + \frac{\beta_3}{d_j^3} \right) * \left[\frac{\left(1 - \frac{h_{ij}}{h_j}\right)^{\beta_0} - \left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_0}}{1 - \left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_0}} \right] \right\} + \\ &IB * \left\{ d_j^2 - (d_j^2 - d_{6,4j}^2) * \left[\frac{\left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_1} - \left(1 - \frac{h_{ij}}{h_j}\right)^{\beta_1}}{\left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_1} - \left(1 - \frac{6,4}{h_j}\right)^{\beta_1}} \right] \right\} + \\ &IT * \left\{ d_{6,4j}^2 * \left[\beta_5 * \left(\frac{h_{ij} - 6,4}{h_j - 6,4} - 1 \right)^2 \right] + \right. \\ &\quad \left. IM * \left[\frac{1 - \beta_5}{\beta_4^2} * \left(\beta_4 - \frac{h_{ij} - 6,4}{h_j - 6,4} \right)^2 \right] \right\} \end{aligned} \right\} + \varepsilon_{ij}
 \end{aligned}$$

(Continua)

Tabela 6 – Modificações propostas ao modelo de Clark III et al. (1991) para o ajuste de dados de *Tectona grandis* L.f., em região centro-sul do estado de Mato Grosso (Continuação)

$$4 \quad d_{ij} = \left\{ \begin{array}{l} IS * d_j^2 \left\{ 1 + \left(\beta_2 + \frac{\beta_3}{d_j^3} \right) * \left[\frac{\left(1 - \frac{h_{ij}}{h_j}\right)^{\beta_0} - \left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_0}}{1 - \left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_0}} \right] \right\} + \\ IB * \left\{ d_j^2 - (d_j^2 - d_{28\%j}^2) * \left[\frac{\left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_1} - \left(1 - \frac{h_{ij}}{h_j}\right)^{\beta_1}}{\left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_1} - \left(1 - \frac{h_{28\%j}}{h_j}\right)^{\beta_1}} \right] \right\} + \\ IT * \left\{ d_{28\%j}^2 * \left[\beta_5 * \left(\frac{h_{ij} - h_{28\%j}}{h_j - h_{28\%j}} - 1 \right)^2 \right] + \right. \\ \left. IM * \left[\frac{1 - \beta_5}{\beta_4^2} * \left(\beta_4 - \frac{h_{ij} - h_{28\%j}}{h_j - h_{28\%j}} \right)^2 \right] \right\} \end{array} \right\} + \varepsilon_{ij}$$

$$5 \quad d_{ij} = \left\{ \begin{array}{l} IS * d_j^2 \left\{ 1 + \left(\beta_2 + \frac{\beta_3}{d_j^3} \right) * \left[\frac{\left(1 - \frac{h_{ij}}{h_j}\right)^{\beta_0} - \left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_0}}{1 - \left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_0}} \right] \right\} + \\ IB * \left\{ d_j^2 - (d_j^2 - d_{5,3j}^2) * \left[\frac{\left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_1} - \left(1 - \frac{h_{ij}}{h_j}\right)^{\beta_1}}{\left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_1} - \left(1 - \frac{5,3}{h_j}\right)^{\beta_1}} \right] \right\} + \\ IT * \left\{ d_{5,3j}^2 * \left[\beta_5 * \left(\frac{h_{ij} - 5,3}{h_j - 5,3} - 1 \right)^2 \right] + (\beta_6 * d_{73\%j}) + \right. \\ \left. IM * \left[\frac{1 - \beta_5}{\beta_4^2} * \left(\beta_4 - \frac{h_{ij} - 5,3}{h_j - 5,3} \right)^2 \right] \right\} \end{array} \right\} + \varepsilon_{ij}$$

$$6 \quad d_{ij} = \left\{ \begin{array}{l} IS * d_j^2 \left\{ 1 + \left(\beta_2 + \frac{\beta_3}{d_j^3} \right) * \left[\frac{\left(1 - \frac{h_{ij}}{h_j}\right)^{\beta_0} - \left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_0}}{1 - \left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_0}} \right] \right\} + \\ IB * \left\{ d_j^2 - (d_j^2 - d_{28\%j}^2) * \left[\frac{\left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_1} - \left(1 - \frac{h_{ij}}{h_j}\right)^{\beta_1}}{\left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_1} - \left(1 - \frac{h_{28\%j}}{h_j}\right)^{\beta_1}} \right] \right\} + \\ IT * \left\{ d_{28\%j}^2 * \left[\beta_5 * \left(\frac{h_{ij} - h_{28\%j}}{h_j - h_{28\%j}} - 1 \right)^2 \right] + (\beta_6 * d_{73\%j}) + \right. \\ \left. IM * \left[\frac{1 - \beta_5}{\beta_4^2} * \left(\beta_4 - \frac{h_{ij} - h_{28\%j}}{h_j - h_{28\%j}} \right)^2 \right] \right\} \end{array} \right\} + \varepsilon_{ij}$$

(Continua)

Tabela 6 – Modificações propostas ao modelo de Clark III et al. (1991) para o ajuste de dados de *Tectona grandis* L.f., em região centro-sul do estado de Mato Grosso

(Continuação)

$$7 \quad d_{ij} = \left\{ \begin{array}{l} IS * d_j^2 \left\{ 1 + \left(\beta_2 + \frac{\beta_3}{d_j^3} \right) * \left[\frac{\left(1 - \frac{h_{ij}}{h_j}\right)^{\beta_0} - \left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_0}}{1 - \left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_0}} \right] \right\} + \\ IB * \left\{ d_j^2 - (d_j^2 - d_{5,3j}^2) * \left[\frac{\left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_1} - \left(1 - \frac{h_{ij}}{h_j}\right)^{\beta_1}}{\left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_1} - \left(1 - \frac{5,3}{h_j}\right)^{\beta_1}} \right] \right\} + \\ IT * \left\{ d_{5,3j}^2 * \left[\beta_5 * \left(\frac{h_{ij} - 5,3}{h_j - 5,3} - 1 \right)^2 \right] + \left(\beta_6 * \frac{1}{hd_j} \right) + \right. \\ \left. IM * \left[\frac{1 - \beta_5}{\beta_4^2} * \left(\beta_4 - \frac{h_{ij} - 5,3}{h_j - 5,3} \right)^2 \right] \right\} \right\} + \varepsilon_{ij}$$

$$8 \quad d_{ij} = \left\{ \begin{array}{l} IS * d_j^2 \left\{ 1 + \left(\beta_2 + \frac{\beta_3}{d_j^3} \right) * \left[\frac{\left(1 - \frac{h_{ij}}{h_j}\right)^{\beta_0} - \left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_0}}{1 - \left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_0}} \right] \right\} + \\ IB * \left\{ d_j^2 - (d_j^2 - d_{28\%j}^2) * \left[\frac{\left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_1} - \left(1 - \frac{h_{ij}}{h_j}\right)^{\beta_1}}{\left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_1} - \left(1 - \frac{h_{28\%j}}{h_j}\right)^{\beta_1}} \right] \right\} + \\ IT * \left\{ d_{28\%j}^2 * \left[\beta_5 * \left(\frac{h_{ij} - h_{28\%j}}{h_j - h_{28\%j}} - 1 \right)^2 \right] + \left(\beta_6 * \frac{1}{hd_j} \right) + \right. \\ \left. IM * \left[\frac{1 - \beta_5}{\beta_4^2} * \left(\beta_4 - \frac{h_{ij} - h_{28\%j}}{h_j - h_{28\%j}} \right)^2 \right] \right\} \right\} + \varepsilon_{ij}$$

em que: d_j - diâmetro à altura do peito com casca (cm) medido em cada árvore j ; h_j - altura (m) em cada árvore j ; h_{ij} - altura (m) da base do fuste até o ponto onde se alcança o diâmetro d_{ij} em cada árvore j ; d_{ij} - diâmetro (cm) com casca a uma altura h_{ij} em cada árvore j ; $d_{5,3j}$ - diâmetro com casca mensurado (cm) à altura de 5,3 m em cada árvore j ; $d_{28\%}$ - diâmetro à 28% da altura (m); $d_{73\%}$ - diâmetro à 73% da altura (m); $h_{28\%}$ - 28% da altura (m); $h_{73\%}$ - 73% da altura (m); IS , IB , IT e IM - pontos de ligação do modelo de Clark III et al. (1991).

Fonte: o autor.

Demais modificações foram propostas com o estudo dos PMF's (item 3.2), trocando o diâmetro a 5,3 metros de altura ($d_{5,3j}$) pelos diâmetros a 6,4 metros de altura e 28% da altura total ($d_{28\%}$), e acrescentando um novo coeficiente (β_6) com o diâmetro a 73% da altura total ($d_{73\%}$), respectivamente, modificações 3, 4, 5 e 6.

Também foi testada a utilização da relação altura pelo DAP como um descritor da forma do fuste, resultando nas modificações 7 e 8 que utilizaram o inverso da relação altura-diâmetro ($1/hd_j$ ou d/h). Newnham (1988) e de Kozak (1988), incluem a razão d/h nas suas funções, numa tentativa de descrever que a variação da forma do fuste é causada por variações no comprimento relativo da copa.

As notações utilizadas pelas expressões matemáticas correspondentes a cada uma das modificações foram apresentadas no item 3.4 que trata dos modelos de afilamento.

3.6 MODELAGEM NÃO LINEAR DE EFEITO MISTO

Os modelos de efeitos mistos não lineares contêm parâmetros de efeitos fixos comuns a todos as árvores e parâmetros de efeitos aleatórios específicos para um critério de classificação, avaliados no presente estudo em relação à classe de DAP e à árvore.

A *proc nlmixed* no SAS foi utilizada para estimar os parâmetros de efeitos fixos β_{kj} e os parâmetros variância-covariância associados aos parâmetros de efeitos aleatórios μ_{kj} no modelo de Clark III et al. (1991).

A abordagem utilizada para definir em quais parâmetros deve ser aplicado o efeito aleatório foi ajustar os modelos com as possíveis combinações de parâmetros de efeitos fixos e aleatórios, e verificar o melhor.

Uma vez determinados os β_{kj} e os μ_{kj} , a equação foi ajustada e as estimativas dos parâmetros de efeitos fixos foram utilizadas para prever uma resposta média de diâmetros em várias posições ao longo do fuste de uma árvore, com as estimativas dos parâmetros de efeitos aleatórios ajustados para minimizar os erros da estimativa.

As equações de afilamento de efeitos mistos não-lineares também foram usadas para fazer calibrações de d_{ij} específicas da árvore. Estas foram baseadas na previsão do vetor de parâmetros de efeitos aleatórios (μ_{kj}), o que requereu uma ou mais medidas ao longo do fuste de uma nova árvore para prever as alterações nos parâmetros correspondentes a mesma. A previsão de parâmetros de efeitos aleatórios foi realizada

por um estimador Bayes aproximado (TRINCADO; BURKHART, 2006; VONESH; CHINCHILLI, 1997).

$$\hat{\mu}_j \cong \hat{D}Z_j^T (Z_j \hat{D}Z_j^T + \hat{R}_j)^{-1} \hat{e}_k$$

onde \hat{D} é a matriz estimada de variância-covariância para os parâmetros de efeitos aleatórios μ_j ; \hat{R}_j é a matriz de variância-covariância estimada para o termo de erro; e Z_j é a matriz de derivadas parciais em relação aos parâmetros de efeitos aleatórios $Z_j = \partial f(x_j, \beta, 0) / \partial \mu_j |_{\hat{\beta}, 0}$.

Com os parâmetros de efeitos aleatórios estimados, foram alcançadas calibrações específicas dos diâmetros em várias posições ao longo de um fuste (VONESH; CHINCHILLI, 1997):

$$\hat{d}_{ij} = f(x_j, \hat{\beta}, 0) + Z_j \mu_j$$

Um exemplo de como montar as matrizes e aplicar a calibração dos efeitos aleatórios para uma árvore é apresentado passo-a-passo no Apêndice A.

Para avaliar qual posição de d_{ij} é mais adequada para calibrações específicas da árvore, vários diâmetros ao longo do fuste foram utilizados para estimar os parâmetros de efeitos aleatórios: 0,1, 0,5, 0,7, 1,0, 1,3, 2,0, 2,3, 3,0, 3,3, 4,0, 4,3, 5,0, 5,3 e 6,0 m de altura, e verificado a melhor combinação através das estatísticas de ajuste e precisão. A posição máxima de 6 metros de altura foi definida na tentativa de não inviabilizar a aplicação na metodologia em campo, uma vez que acima dessa altura as copas poderiam dificultar a mensuração dos d_i .

Uma subamostra de 100 árvores, como recomendado por Kozak (1988), que não compõe a base de dados do ajuste, foi utilizada para a verificação da posição de calibração dos efeitos (Tabela 7).

Para determinar a combinação de efeitos fixos com aleatórios no modelo de Clark III et al. (1991) e as posições de calibração dos efeitos ao longo do fuste das árvores, utilizou-se o critério de informação Bayesiano de Schwarz (BIC). E com base na estatística BIC foi selecionada a melhor combinação de parâmetros e as posições de calibração dos efeitos ao longo do fuste.

Tabela 7 – Análise descritiva das 100 árvores que compõem a base de dados do ajuste de funções de afilamento para *Tectona grandis* L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso

Variável	Média	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)	Mínimo	Máximo
d	20,35	2,91	14,3	15,92	29,06
d_i	14,52	6,79	46,8	0,30	40,43
d_{5,3}	15,70	2,53	16,1	11,63	23,19
h	17,9	1,1	6,1	15,4	19,9
h_i	7,0	5,0	71,4	0,1	19,9

em que: d – diâmetro à altura do peito, em cm; d_i – diâmetro na posição *i*, em cm; d_{5,3} – diâmetro mensurado à 5,3 metros de altura, em cm; h – altura, em m; h_i – altura na posição *i*, em m.

Fonte: o autor.

3.6.1 Estatísticas auxiliares

Os modelos original proposto por Clark III et al. (1991), com apenas efeitos fixos e com efeitos fixos e aleatórios foram avaliados quanto ao desempenho das estimativas nas alturas relativas de medição de 0-10%, 10%-30%, 30%-50%, 50%-70% e 70%-90% da altura total.

Para analisar o desempenho das estimativas foram calculados o Desvio (D), o Desvio Padrão das Diferenças (SD), o Somatório dos Quadrados dos Resíduos Relativos (SQRR) e os Resíduos Percentuais (RP), como utilizado por Figueiredo Filho et al. (1996), Fischer (1997), Scolforo et al. (1998), Assis et al. (2001), Assis et al. (2002), Queiroz (2006), Favalessa et al. (2012a; 2012b) e Môra (2015) (Tabela 8).

A partir dessas estatísticas foi elaborado uma classificação para expressar o desempenho dos modelos testados na estimativa dos diâmetros (d_{ij}) ao longo do fuste. Considerando cada uma das estatísticas auxiliares foram atribuídas notas de 1 a 3, respectivamente, para a mais acurada e a menos acurada, em cada posição relativa de medição, procedimento esse também utilizado por Figueiredo Filho et al. (1996), Fischer (1997), Scolforo et al. (1998), Assis et al. (2001), Figueiredo et al. (2006), Queiroz (2006), Souza (2007, 2009) e Favalessa et al. (2012a; 2012b).

Tabela 8 – Teste de acuracidade para estimativa dos diâmetros ao longo do fuste de *Tectona grandis* L. f., região centro-sul do estado de Mato Grosso

Estatística	Expressão
Desvio (D)	$\frac{\sum_{i=1}^n Diff_i}{n}$
Desvio Padrão das Diferenças (SD)	$\left[\frac{\sum_{i=1}^n (Diff_i - d_i)^2}{n-1} \right]^{0,5}$
Soma do Quadrado do Resíduo Relativo (SQRR)	$\sum_{i=1}^n \left(\frac{Diff_i}{d_i} \right)^2$
Porcentagem dos Resíduos (RP)	$\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Diff_i}{d_i} \right)^2}{n} * 100$

em que: $Diff_i$ – diâmetro real com casca a uma altura h_i em cada árvore j menos o diâmetro estimado com casca a uma altura h_i em cada árvore j (resíduo); d_i – diâmetro real com casca a uma altura h_i em cada árvore j (cm); n – número de observações.

Fonte: Adaptado de Favalessa et al. (2012a).

3.6.2 Representação gráfica dos ajustes

Os perfis reais e estimados para os diâmetros ao longo do fuste, assim como as representações gráficas de três árvores finas ($10\text{ cm} \geq DAP_j > 27\text{ cm}$), médias ($27\text{ cm} \geq DAP_j > 43\text{ cm}$) e grossas ($43\text{ cm} \geq DAP_j > 60\text{ cm}$), aleatoriamente selecionadas dos dados, foram utilizados para descrever o ajuste dos fustes e a flexibilidade das equações. As estimativas de diâmetros do fuste foram calculadas pelo modelo de Clark III et al. (1991) ajustado nos *proc nlim* e *proc nlmixed*, com os parâmetros fixos e com parâmetros fixos e aleatórios.

3.6.3 Aplicação do modelo fixo com os efeitos aleatórios

A acurácia das estimativas pelo modelo de Clark III et al. (1991) ajustado com os parâmetros fixos e os efeitos aleatórios calibrados foi verificada em uma base de dados distinta da utilizada para o ajuste do modelo (Tabela 9).

A seleção das árvores para a calibração e aplicação ocorreu de forma aleatória, com árvores cubadas aos 34 anos após o plantio pertencentes a empresa Cáceres Florestal.

Tabela 9 – Análise descritiva das doze árvores que compõem a base de dados da aplicação do modelo ajustado com os parâmetros fixos e os efeitos aleatórios calibrados para *Tectona grandis* L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso

Variável	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)	Mínimo	Máximo
d	41,44	5,78	13,9	32,10	52,00
d_i	30,15	13,00	43,1	13,00	59,60
d_{5,3}	34,00	4,76	14,0	27,75	41,88
h	26,0	1,9	7,3	22,0	28,8
h_i	8,9	7,6	85,4	0,5	27,8

em que: d – diâmetro à altura do peito, em cm; d_i – diâmetro na posição *i*, em cm; d_{5,3} – diâmetro mensurado à 5,3 metros de altura, variável independente do modelo de Clark III et al. (1991), em cm; h – altura, em m; h_i – altura na posição *i*, em m.

Fonte: o autor.

3.7 AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DOS MODELOS

3.7.1 Seleção das equações

A acurácia de todos os modelos foi avaliada mediante a análise gráfica de resíduos para identificação de possíveis erros sistemáticos, pelo erro padrão da estimativa em porcentagem ($S_{yx}\%$) e pelo coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) (SCHNEIDER et al., 2009), nos casos em que a variável dependente é logaritimizada foi realizada a correção da discrepância logarítmica pelo índice de Meyer (IM), além da análise gráfica da distribuição dos resíduos.

$$S_{yx\%} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p}} * 100 \quad R_{aj.}^2 = 1 - \left(\frac{SQ_{res}}{SQ_t}\right) * \left(\frac{n - 1}{n - p}\right) \quad IM = \exp(0,5 * Syx^2)$$

em que: $R^2_{aj.}$ – coeficiente de determinação ajustado; S_{yx} – erro padrão da estimativa; $S_{yx\%}$ – erro padrão da estimativa em porcentagem; SQ_{res} – soma do quadrado dos resíduos; SQ_t – soma dos quadrados totais; n – número de dados observados; p – número de coeficientes do modelo; y_i – variável observada; \hat{y}_i – variável estimada; IM – índice de Meyer;

3.7.2 Condicionantes da regressão

As condicionantes de regressão foram avaliadas pelos testes de independência dos resíduos de Durbin-Watson (DW), homocedasticidade de White (W) e normalidade dos resíduos de Kolmogorov-Smirnov (KS), como apresentado por Schneider et al. (2009).

$$DW = \frac{\sum_{i=2}^n (E_i - E_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n E_i^2} \quad W = n * R^2 \quad KS_j = \max \left\{ \max_{1 \leq i \leq n_j} [j/n_j] - u_i \right\}$$

em que: E_i – erro estocástico ou perturbação da regressão; n – tamanho da amostra; R^2 – coeficiente de determinação da regressão; $u_i = 1 - \exp\{-(x_i - a)/b\}^c$; n_j – número de árvores na j -ésima combinação de idade-amostra; x_i – diâmetro, ordenado em ordem crescente em cada combinação de idade-amostra ($x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_{n_j}$).

3.7.3 Avaliação de multicolinearidade das equações

A identificação da colinearidade da estimativa dos coeficientes de regressão foi feita com base no fator de inflação da variância (VIF); quando o valor excedeu a 10 indicou a existência de problemas com multicolinearidade (KUTNER et al., 2004; MONSERUD; STERBA, 1996).

3.7.4 Avaliação estatística das equações não lineares com efeito misto

Tanto o critério de informação de Akaike (AIC) como o critério de informação Bayesiano de Schwarz (BIC), são estimadores log-verossimilháveis penalizados pelos números de parâmetros do modelo. Portanto, será utilizado a estatística BIC que penaliza mais em modelos com mais parâmetros (WEISS, 2005):

$$BIC = -2 \ln(L) + \lambda \ln(m)$$

em que L é o valor de máxima verossimilhança (ML); λ é o número de parâmetros efetivos, que é a soma do número de parâmetros de efeitos fixos p e o número efetivo de parâmetros estimados de variância e covariância; e m é o número de árvores para modelos de efeitos mistos e o número total de observações para modelos de efeitos fixos.

3.8 VOLUME

3.8.1 Volume calculado pela integral da função de afilamento

Os volumes (v) calculados pela regressão que descreve os sólidos de revolução foram obtidos pela integração de suas áreas seccionais (g_i) dos fustes, entre o limite inferior (h_1) e o superior (h_2) que foram estabelecidos. Quando se desejava obter o volume total de uma árvore, então para h_1 foi atribuído o valor zero (0) e o valor de h_2 era igual à altura da árvore (h). A fórmula reduzida de representação para a integração dos volumes é mostrada a seguir:

$$v = \int_{h_1}^{h_2} g_i \delta h \quad \rightarrow \quad v = \int_{h_1}^{h_2} \frac{\pi * d_i^2}{40000} \delta h \quad \rightarrow \quad v = k \int_{h_1}^{h_2} d_i^2 \delta h$$

em que: $k = \pi / 40000$; d_i = diâmetro correspondente a qualquer altura h_i , ao longo do fuste da árvore, em cm.

Com os volumes calculados pela estimativa do modelo de Clark, procedeu-se à integração da seguinte forma:

$$V \int_0^{h_t} d^2 h(dh) + \int_{h_t}^{1,3} d^2 h(dh) + \int_{1,3}^{5,3} d^2 h(dh) + \int_{5,3}^{h_1} d^2 h(dh) + \int_{h_1}^{h_2} d^2 h(dh) + \int_{h_1}^{u=h} d^2 h(dh)$$

em que: h_t é a altura correspondente ao toco.

Após integração, o modelo de Clark III et al. (1991) assume a seguinte forma:

$$\begin{aligned}
V = & \left\{ \left(I_1 * d^2 * \left[1 - \left(1 - \frac{1,3}{h} \right)^{\beta_0} * \frac{\beta_2 + \frac{\beta_3}{d^3}}{1 - \left(1 - \frac{1,3}{h} \right)^{\beta_0}} \right] * (U_1 - L_1) + \frac{\beta_2 + \frac{\beta_3}{d^3}}{1 - \left(1 - \frac{1,3}{h} \right)^{\beta_0}} \right) \right. \\
& * \left. \frac{\left[\left(1 - \frac{L_1}{h} \right)^{\beta_0} * (h - L_1) - \left(1 - \frac{L_1}{h} \right)^{\beta_0} * (h - U_1) \right]}{\beta_0 + 1} \right\} * I_2 * I_3 \\
& * \left[d^2 - (d^2 - d_{5,3}^2) * \frac{\left(1 - \frac{1,3}{h} \right)^{\beta_1}}{\left(1 - \frac{1,3}{h} \right)^{\beta_1} - \left(1 - \frac{5,3}{h} \right)^{\beta_1}} \right] * (U_2 - L_2) + (d^2 - d_{5,3}^2) \\
& * \left. \frac{\left[\left(1 - \frac{L_2}{h} \right)^{\beta_1} * (h - L_2) - \left(1 - \frac{U_2}{h} \right)^{\beta_1} * (h - U_2) \right]}{\left[\left(1 - \frac{1,3}{h} \right)^{\beta_1} - \left(1 - \frac{5,3}{h} \right)^{\beta_1} \right] * (\beta_1 + 1)} \right\} \\
& + \left\{ I_4 * d_{5,3}^2 * \left[\beta_5 * U_3 * L_3 - \beta_5 * \frac{(U_3 - 5,3)^2 - (L_3 - 5,3)^2}{h - 5,3} \right] + \left(\frac{1}{3} \right) * \beta_5 \right. \\
& * \left[\frac{(U_3 - 5,3)^2 - (L_3 - 5,3)^2}{(h - 5,3)^2} \right] + \left(\frac{1}{3} \right) * I_5 * (1 - \beta_5) * \frac{[\beta_4 * ((U_3 - 5,3)^2 - (L_3 - 5,3)^2)]^3}{\beta_4} \\
& \left. - \left(\frac{1}{3} \right) * I_6 * (1 - \beta_5) * \frac{[\beta_4 * (h - 5,3) - L_3 + 5,3]^3}{\beta_4} \right\}
\end{aligned}$$

em que:

$$\begin{aligned}
L_1 & \begin{cases} = h_1 \text{ se } h_1 > 0; \\ = 0 \text{ se } h_1 \leq 0; \end{cases} & L_2 & \begin{cases} = h_1 \text{ se } h_1 > 1,3; \\ = 1,3 \text{ se } h_1 \leq 1,3; \end{cases} & L_3 & \begin{cases} = h_1 \text{ se } h_1 > 5,3; \\ = 5,3 \text{ se } h_1 \leq 5,3; \end{cases} \\
U_1 & \begin{cases} = h_2 \text{ se } h_2 < 1,3; \\ = 1,3 \text{ se } h_2 \geq 1,3; \end{cases} & U_2 & \begin{cases} = h_2 \text{ se } h_2 < 5,3; \\ = 5,3 \text{ se } h_2 \geq 5,3; \end{cases} & U_3 & \begin{cases} = h_2 \text{ se } h_2 < h; \\ = h \text{ se } h_2 \geq h; \end{cases} \\
I_1 & \begin{cases} = 1 \text{ se } h_1 < 1,3; \\ = 0 \text{ se } h_1 \geq 1,3; \end{cases} & I_2 & \begin{cases} = 1 \text{ se } h_1 < 5,3; \\ = 0 \text{ se } h_1 \geq 5,3; \end{cases} & I_3 & \begin{cases} = 1 \text{ se } h_2 > 1,3; \\ = 0 \text{ se } h_2 \leq 1,3; \end{cases} \\
I_4 & \begin{cases} = 1 \text{ se } h_2 > 5,3; \\ = 0 \text{ se } h_2 \leq 5,3; \end{cases} & I_5 & \begin{cases} = 1 \text{ se } (L_3 - 5,3) < [\beta_4(h - 5,3)]; \\ = 0 \text{ se } (L_3 - 5,3) \geq [\beta_4(h - 5,3)]; \end{cases} & I_6 & \begin{cases} = 1 \text{ se } (U_3 - 5,3) < [\beta_4(h - 5,3)]; \\ = 0 \text{ se } (U_3 - 5,3) \geq [\beta_4(h - 5,3)]; \end{cases}
\end{aligned}$$

L_x – limite inferior do segmento analisado, sendo $x = 1$ até 3; U_x – limite superior do segmento analisado, sendo $x = 1$ até 3; l_x – ponto de ligação do modelo de Clark III et al. (1991), sendo $x = 1$ até 4; β_x – coeficientes do modelo de Clark III et al. (1991), sendo $x = 1$ até 5; h_i – altura na posição i , em metros; h – altura da árvore, em metros.

3.9 TABELA DE SORTIMENTO

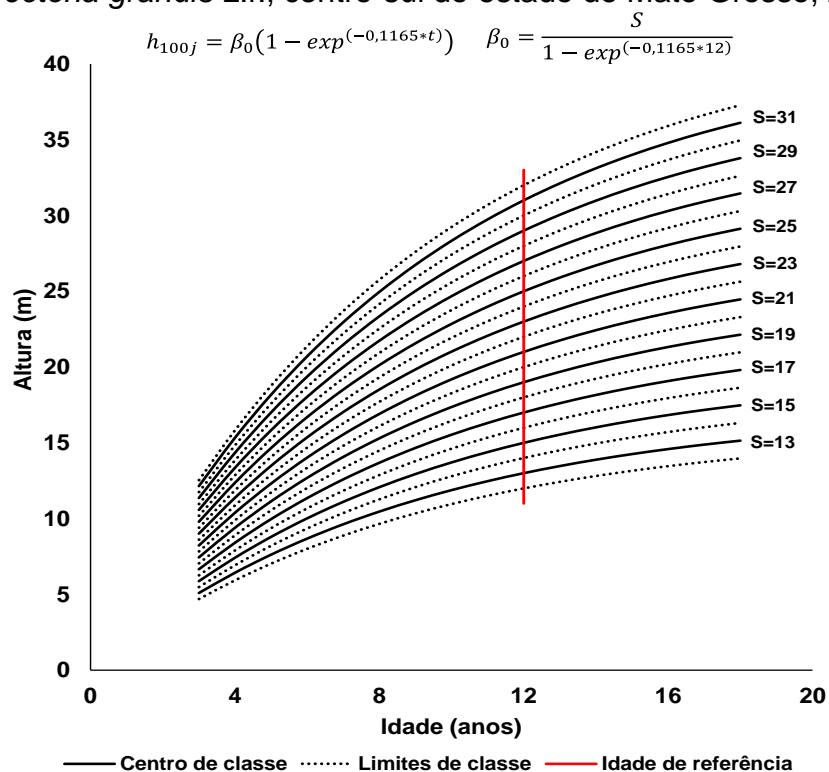
Para fins de demonstração, foi construída a tabela de sortimento para classes de DAP com amplitude de 2 cm, e centros de classe no intervalo de 10 a 60 cm, para um sítio intermediário com altura dominante (h_{100}) de 21 m.

As alturas foram estabelecidas para cada centro de classe. A central, calculada pela equação de relação hipsométrica definida no item 3.9.2, e as demais para os limites inferior e superior à 95% de confiança do modelo da relação hipsométrica selecionado.

3.9.1 Altura dominante

Para fins de utilização do modelo de afilamento para o povoamento foi necessário descrever a qualidade do sítio. Para isso foi adotada a classificação de sítio proposta por Favalessa [2018] para a Fazenda Teca do Brasil (Figura 5). A classificação utilizou o modelo monomolecular e idade de referência de 12 anos, as estatísticas de ajuste e precisão foram S_{yx} % de 8,55% e $R^2_{aj.}$ de 0,94.

Figura 5 – Classificação de sítio proposta por Favalessa [2018] com o modelo monomolecular e recálculo do β_0 por sítio, idade de referência 12 anos, *Tectona grandis* L.f., centro-sul do estado de Mato Grosso, 2018



Legenda: h_{100j} – altura dominante da árvore j , em m; β_0 – coeficiente de regressão; t – idade, em anos; S – índice de sítio.

Fonte: Adaptado de Favalessa [2018].

3.9.2 Relação hipsométrica

Os modelos utilizados nessa etapa foram discriminados por autor e a sua expressão (Tabela 10). Para os modelos genéricos, a seleção de variáveis foi realizada pelo procedimento “stepwise” em função dos coeficientes de determinação parciais em cada um dos passos e pela plausibilidade das variáveis que entraram no modelo conforme a seleção pelo procedimento, pois em alguns casos pode ocorrer que variáveis independentes altamente correlacionadas não expressem realismo biológico.

Tabela 10 – Modelos de relação hipsométrica avaliados para *Tectona grandis* L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso

Autor(es)	Modelo
Curtis	$h_j = \beta_0 + \beta_1 * \frac{1}{d_j} + \varepsilon_j$
Curtis logaritimizado	$\ln h_j = \beta_0 + \beta_1 * \frac{1}{d_j} + \varepsilon_j$
Favalessa [2018]	$h_j = -0,35007 + 0,21593 * d_j + 0,74922 * h_{100j}$
Henricksen	$h_j = \beta_0 + \beta_1 * \ln d_j + \varepsilon_j$
Modelo genérico 1	$\ln h_j = \beta_0 + \beta_1 * \frac{1}{d_j} + \beta_2 * h_{100j} + \varepsilon_j$
Modelo genérico 2	$h_j = \beta_0 + \beta_1 * \ln d_j + \beta_2 * h_{100j}^2 + \varepsilon_j$
Stoffels e Van Soest	$\ln h_j = \beta_0 + \beta_1 * \ln d_j + \varepsilon_j$
Trorey	$h_j = \beta_0 + \beta_1 * d_j + \beta_2 * d_j^2 + \varepsilon_j$

em que: h_j – altura da árvore j , em m; d_j – diâmetro a altura do peito da árvore j , em cm; β_K – coeficiente de regressão; \ln – logaritmo neperiano; h_{100j} – altura dominante da árvore j , em m; e ε_j – erro aleatório.

Fonte: o autor.

Os modelos foram ajustados no sistema estatístico SAS – *Statistical Analysis System* – versão 9.3 (SAS Institute Inc., 2016) empregando a *proc reg*.

3.9.3 Diâmetros à 0,1 e 2,0 m de altura

Com base nos resultados obtidos até essa etapa, para o recálculo dos efeitos aleatórios, faz-se necessário estimar o diâmetro à 0,1 m de altura ($d_{0,1j}$) e o diâmetro à 2,0 m de altura ($d_{2,0j}$). Os modelos utilizados para estimar o $d_{0,1j}$ e o $d_{2,0j}$ foram discriminados por autor e sua expressão, ou então através procedimento de seleção de variáveis “*stepwise*” (Tabela 11).

Tabela 11 – Modelos de diâmetro à 0,1 m de altura ($d_{0,1j}$) e de diâmetro à 2,0 m de altura ($d_{2,0j}$) avaliados para *Tectona grandis* L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso

Autor(es)	Modelo
Brenac	$\ln d_{ij} = \beta_0 + \beta_1 * \ln d_j + \beta_2 * \frac{1}{d_j} + \varepsilon_j$
Curtis	$d_{ij} = \beta_0 + \beta_1 * \frac{1}{d_j} + \varepsilon_j$
Curtis logaritimizado	$\ln d_{ij} = \beta_0 + \beta_1 * \frac{1}{d_j} + \varepsilon_j$
Dissescu e Meyer	$d_{ij} = \beta_0 + \beta_1 * h_j * d_j + \beta_2 * d_j^2 + \varepsilon_j$
Modelo Linear Simples	$d_{ij} = \beta_0 + \beta_1 * d_j + \varepsilon_j$
Henricksen	$d_{ij} = \beta_0 + \beta_1 * \ln d_j + \varepsilon_j$
Hohenadl e Krenm	$d_{ij} = \beta_0 + \beta_1 * d_j + \beta_2 * d_j^2 + \varepsilon_j$
Husch	$\ln d_{ij} = \beta_0 + \beta_1 * \ln d_j + \varepsilon_j$
Kopezky Gerhardt	$d_{ij} = \beta_0 + \beta_1 * d_j^2 + \varepsilon_j$
Modelo genérico 3	$\ln d_{ij} = \beta_0 + \beta_1 * \frac{1}{d_j} + \beta_2 * \sqrt{d_j * h_j} + \varepsilon_j$
Modelo genérico 4	$\ln d_{ij} = \beta_0 + \beta_1 * \sqrt{d_j * h_j} + \varepsilon_j$
Modelo genérico 5	$d_{ij} = \beta_0 + \beta_1 * d_j + \beta_2 * h_j + \varepsilon_j$
Modelo genérico 6	$\ln d_{ij} = \beta_0 + \beta_1 * \ln d_j + \beta_2 * \frac{1}{\sqrt{d_j * h_j}} + \varepsilon_j$
Schumacher e Hall	$\ln d_{ij} = \beta_0 + \beta_1 * \ln d_j + \beta_2 * \ln h_j + \varepsilon_j$
Spurr	$d_{ij} = \beta_0 + \beta_1 * d_j^2 * h_j + \varepsilon_j$
Spurr logaritimizado	$\ln d_{ij} = \beta_0 + \beta_1 * d_j^2 * h_j + \varepsilon_j$
Stoate	$d_{ij} = \beta_0 + \beta_1 * h_j + \beta_2 * d_j^2 + \beta_3 * d_j^2 * h_j + \varepsilon_j$
Stoffels e Van Soest	$\ln d_{ij} = \beta_0 + \beta_1 * \ln d_j + \varepsilon_j$

em que: d_j – diâmetro a altura do peito da árvore j , em cm; d_{ij} – diâmetro relativo às alturas de 0,1 ou 0,2

m de altura da árvore j , em cm; β_k – coeficiente de regressão; \ln – logaritmo neperiano; h_j – altura da árvore j , em m; e ε_j – erro aleatório.

Fonte: o autor.

3.9.4 Diâmetro à 5,3 m de altura

Com base nos resultados obtidos até essa etapa, para a aplicação da equação de Clark et al. (1991) com efeito misto também é necessário estimar o diâmetro à 5,3 m de altura ($d_{5,3j}$) como variável independente do modelo. Os modelos utilizados para estimar o $d_{5,3j}$ foram discriminados por autor e sua expressão, ou então através procedimento de seleção de variáveis “stepwise” (Tabela 12).

Tabela 12 – Modelos de diâmetro à 5,3 m de altura ($d_{5,3j}$) avaliados para *Tectona grandis* L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso

Autor(es)	Modelo
Brenac	$\ln d_{5,3j} = \beta_0 + \beta_1 * \ln d_j + \beta_2 * \frac{1}{d_j} + \varepsilon_j$
Clark III et al.	$d_{5,3j} = d_j \left[\beta_0 + \beta_1 * \left(\frac{5,3}{h_j} \right)^2 \right] + \varepsilon_j$
Curtis	$d_{5,3j} = \beta_0 + \beta_1 * \frac{1}{d_j} + \varepsilon_j$
Curtis logaritimizado	$\ln d_{5,3j} = \beta_0 + \beta_1 * \frac{1}{d_j} + \varepsilon_j$
Dissescu e Meyer	$d_{5,3j} = \beta_0 + \beta_1 * h_j * d_j + \beta_2 * d_j^2 + \varepsilon_j$
Equação da reta	$d_{5,3j} = \beta_0 + \beta_1 * d_j + \varepsilon_j$
Henricksen	$d_{5,3j} = \beta_0 + \beta_1 * \ln d_j + \varepsilon_j$
Hohenadl e Krenm	$d_{5,3j} = \beta_0 + \beta_1 * d_j + \beta_2 * d_j^2 + \varepsilon_j$
Husch	$\ln d_{5,3j} = \beta_0 + \beta_1 * \ln d_j + \varepsilon_j$
Kopezky Gerhardt	$d_{5,3j} = \beta_0 + \beta_1 * d_j^2 + \varepsilon_j$
Modelo genérico 7	$\ln d_{5,3j} = \beta_0 + \beta_1 * k_j^3 + \beta_2 * \ln d_j^2 * h_j + \varepsilon_j$
Modelo genérico 8	$d_{5,3j} = \beta_0 + \beta_1 * k_j^3 + \beta_2 * \sqrt{d_j^2 * h_j} + \varepsilon_j$
Schumacher e Hall	$\ln d_{5,3j} = \beta_0 + \beta_1 * \ln d_j + \beta_2 * \ln h_j + \varepsilon_j$
Spurr	$d_{5,3j} = \beta_0 + \beta_1 * d_j^2 * h_j + \varepsilon_j$
Spurr logaritimizado	$\ln d_{5,3j} = \beta_0 + \beta_1 * d_j^2 * h_j + \varepsilon_j$
Stoate	$d_{5,3j} = \beta_0 + \beta_1 * h_j + \beta_2 * d_j^2 + \beta_3 * d_j^2 * h_j + \varepsilon_j$
Stoffels e Van Soest	$\ln d_{5,3j} = \beta_0 + \beta_1 * \ln d_j + \varepsilon_j$

em que: d_j – diâmetro a altura do peito da árvore j , em cm; $d_{5,3j}$ – diâmetro à 5,3 m de altura da árvore j , em

cm; β_k – coeficiente de regressão; \ln – logaritmo neperiano; h_j – altura da árvore j , em m; k_j – diâmetro à 2 metros de altura dividido pelo diâmetro à 1,3 metros de altura, da árvore j ; e \mathcal{E}_{ij} – erro aleatório.

Fonte: o autor.

3.9.5 Sortimentos

Os sortimentos foram definidos com base nos diâmetros mínimos de uso, denominados diâmetros na ponta fina (d_{fina}). As classes de sortimentos determinadas (Tabela 13) foram obtidas a partir de informações coletadas junto às empresas que operam com plantios florestais de *Tectona grandis* L.f. no estado de Mato Grosso.

A receita para cada sortimento foi definida com base no relatório quinzenal da International Tropical Timber Organization (ITTO), do mês de maio de 2018, para produtos exportados do Brasil para a Índia (ITTO, 2018). A receita do resíduo foi definida a partir de informações coletadas junto às empresas que comercializam o resíduo como lenha no mercado interno.

Tabela 13 – Classes de sortimento para toras de *Tectona grandis* L.f., na região centro-sul do estado de Mato Grosso

Sortimento	Diâmetro na ponta fina (d_{fina})	Comprimento (ℓ)	Receita (US\$.m ⁻³)
S1	$d_{fina} \geq 49$ cm	$\ell = 4,6$ m	540,00
S2	$d_{fina} \geq 39$ cm	$\ell = 3,7$ m	491,00
S3	$d_{fina} \geq 29$ cm	$\ell = 2,4$ m	442,00
S4	$d_{fina} \geq 19$ cm	$\ell = 2,4$ m	393,00
S5	$d_{fina} \geq 7$ cm	$\ell = 1,0$ m	344,00
Resíduo	$d_{fina} < 7$ cm	-	21,00

Fonte: o autor.

3.10 SISTEMA DE ANÁLISE, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO SORTIMENTO FLORESTAL

O Sistema de Análise, Simulação e Otimização do Sortimento Florestal desenvolvido no presente trabalho está composto por dois módulos principais. O primeiro, o Módulo de Traçamento das Toras (MTT), e o segundo, Módulo de Otimização

do Sortimento (MOS). Fazem parte também do sistema alguns módulos complementares com a finalidade de estimar parâmetros dendrométricos (altura, diâmetros, volume, afilamento), gerenciar o intercâmbio de informações e apresentar os resultados.

O simulador foi construído com o auxílio do *software* GNU Octave 4.2.1, utilizando o *pacote io* para importação e exportação de dados através de planilhas do *Microsoft Excel®*, e o *pacote glpk* para a otimização. Buscou-se, fundamentalmente, gerar um sistema de fácil uso para profissionais de Engenharia Florestal.

Para árvores, o simulador é capaz de realizar a otimização de sortimentos minimizando o resíduo e/ou maximizando a renda, gerar vários cenários de traçamento e produzir relatórios com resultados parciais e total por árvore, por classe de diâmetro e para o hectare, conforme pode ser avaliado na Figura 6. Os dados de entrada correspondem às informações obtidas através de inventários florestais ou através de simulações, como funções de densidade probabilística.

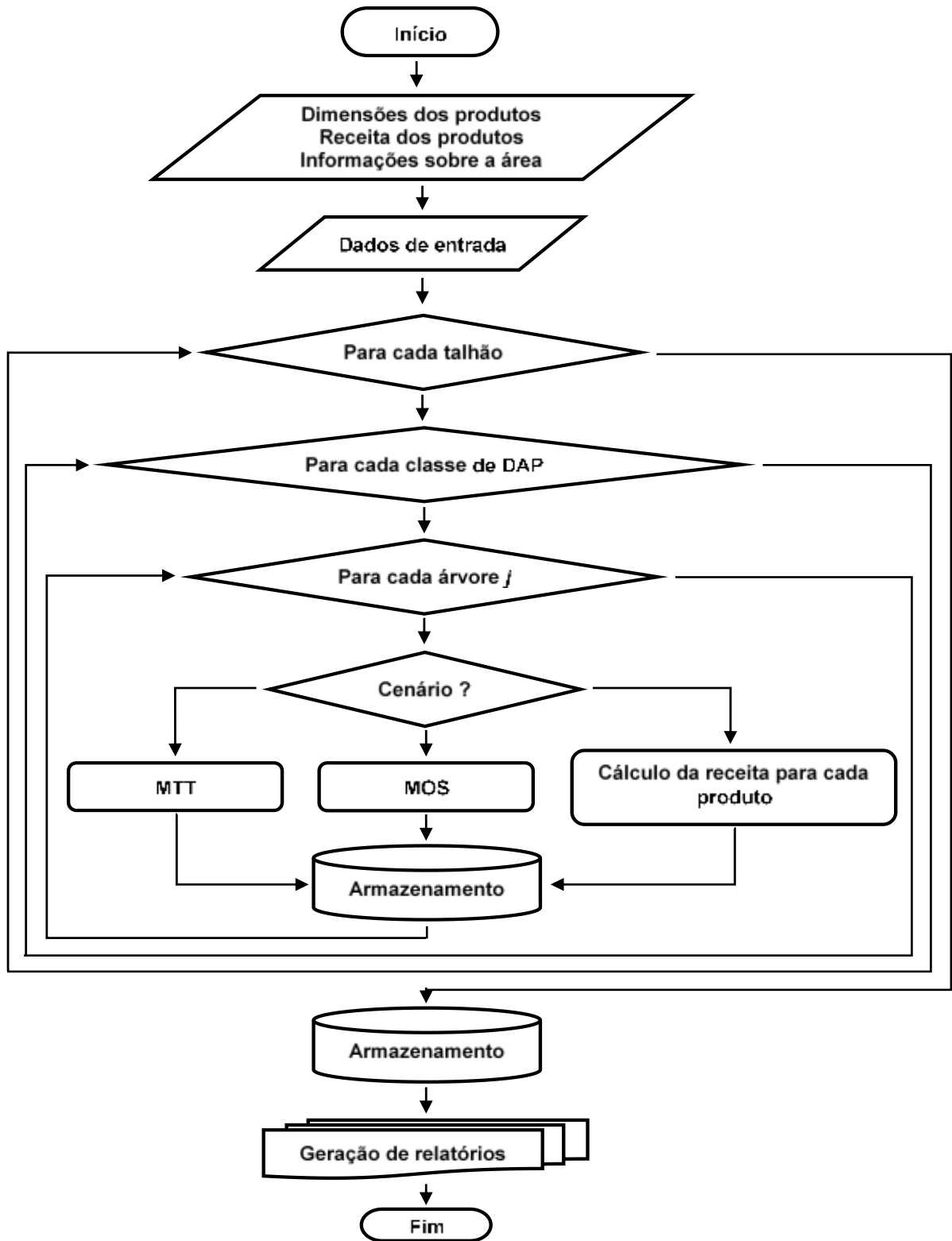
O traçamento da tora pode ser definido como uma listagem da sequência de produtos - sortimentos - que devem ser obtidos a partir de um determinado fuste. Os produtos podem ser iguais ou diferentes entre si. O MTT tem por finalidade gerar padrões de seccionamento para cada uma das árvores das unidades amostrais na idade de corte considerada para a otimização. Para tanto foram avaliadas duas opções:

Geração apenas do traçamento ótimo, segundo critérios de:

- a) Maximização da receita dos fustes (somente valor de mercado do produto);
- b) Maximização do volume utilizado nos fustes (ou minimização do resíduo útil – não considera o toco).

No caso dos fustes florestais, cujo afilamento é caracterizado por diâmetros decrescentes na direção da base para o topo, a localização do resíduo é fundamental na hora de simular os traçamentos. Nas operações florestais de campo, o traçamento geralmente é realizado a partir da base até o topo. Desta maneira, as porções com comprimentos inadequados, que eventualmente surgirão durante o traçamento, estarão localizadas no extremo mais fino da árvore, caracterizando o denominado resíduo comercial. Para tal foi considerado, e utilizado, como comprimento útil do fuste a altura do toco até o ápice ($d_{fina} = 0$ cm).

Figura 6 – Fluxograma do sistema de análise, simulação e otimização do sortimento florestal desenvolvido para *Tectona grandis* L.f., centro-sul do estado de Mato Grosso, 2018



apenas os valores 0 e 1, já que representam a decisão de usar ou não a seção p_i como produto k na árvore j .

A decisão de seccionar uma tora para determinado sortimento (laminação, serraria, energia, resíduo) exige uma resposta com valores inteiros. Em outras palavras, por exemplo, na prática não é possível seccionar 1,3 toras para laminação, ou 2,7 toras para serraria. Logo, as variáveis y_{kij} quantificam o número de toras do sortimento k para a árvore j .

Na quantificação do volume foram utilizadas as variáveis contínuas z_{kj} , uma vez que essa variável normalmente é registrada com pelo menos quatro casas decimais. Sendo z o volume da árvore j utilizado como sortimento k .

Todo problema de programação linear se compõe de uma função objetivo, formada por um vetor de coeficientes da função objetivo (c), e por um conjunto de restrições, formado por uma matriz de parâmetros (A) e um vetor de demandas (b) – $A \cdot x = b$. Nos seguintes itens são descritas detalhadamente as variáveis, a função objetivo e as restrições do MOS.

A notação adotada para a formulação do MOS utilizou letras minúsculas para representar os índices das variáveis: i para posição h_i (p_i) avaliada e j para árvore, como já apresentado nos itens anteriores, e k para sortimentos. As letras maiúsculas utilizadas – I, J, K - correspondem, respectivamente, ao valor máximo de cada um dos índices i, j, k .

Para o caso do MOS foram consideradas três tipos de variáveis. Sendo para árvore $j = 1:J$

$x_{ki} = 1$ se a seção p_i avaliada é utilizada para o sortimento k ; 0 se não; variáveis inteiras que podem assumir apenas os valores 0 e 1, uma vez que representam a decisão de seccionar ou não a seção p_i para o sortimento k ;

$y_{ki} =$ número de toras do sortimento k ; variável inteira que representa quantas toras do sortimento k podem ser cortadas;

$z_k =$ volume para o sortimento k ; variável contínua que representa quanto em volume do sortimento k pode ser obtido.

Todas estas questões práticas foram incorporadas ao MOS na maneira de restrições.

3.10.1 Definição do modelo matemático

Esta etapa foi desenvolvida para solucionar o problema de traçamento inadequado de toras, com o objetivo de maximizar a renda obtida ou então minimizar o resíduo remanescente no povoamento. Deste modo, o modelo matemático adequado ao presente estudo considera a posição física sequencial das seções para os seus respectivos subprodutos. O mesmo possui seus parâmetros diretamente relacionados aos volumes parciais e total da árvore e ao número de toras possíveis para cada sortimento e suas respectivas valorações. As definições das variáveis do modelo são apresentadas na tabela 14.

Tabela 14 – Descrição das variáveis do modelo de otimização proposto

Conjunto	Descrição
V_h	Conjunto de seções que correspondem à altura das árvores (h_j)
V_k	Conjunto das seções das árvores que correspondem ao comprimento do cada sortimento k
V_v	Conjunto do volume total de cada árvore j
K	Conjunto dos sortimentos
Parâmetro	Descrição
p_{kij}	Seções de 0,1 m localizadas na posição p_i correspondendo ao sortimento k para a árvore j
s_k	Número de seções necessárias para compor um sortimento k
v_j	Volume total da árvore j
v_{kj}	Volume utilizado para o sortimento k na árvore j
R_k	Valor monetário atribuído ao m ³ do sortimento k
Variável	Descrição
x_{kij}	Assume o valor 1 quando a seção p_i avaliada na árvore j é utilizada para o sortimento k avaliado
y_{kij}	Número de toras do sortimento k para cada árvore j
z_{kj}	Volume utilizado como sortimento k para cada árvore j

em que: $V_h = \{1, 2, \dots, h_j/0,1\}$; K – número total de sortimentos utilizados.
Fonte: o autor.

A função objetivo, equação 1, maximiza a renda obtida para cada árvore priorizando os sortimentos melhor valorados, enquanto a equação 2 minimiza a diferença entre o volume total da árvore e o volume aproveitado comercialmente da mesma. Com o uso das equações A1 e A2, o somatório dos volumes utilizados para cada sortimento não ultrapasse ao volume total da árvore avaliada. Com o uso das equações A3 e A4, o traçamento será de acordo com os comprimentos dos sortimentos previamente estipulados. O domínio das variáveis x_{kij} , y_{kij} e z_{kj} é definido segundo as restrições A5, A6 e A7. As equações descritas são apresentadas no modelo matemático a seguir.

$$\text{máx} \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K v_{k,j} * R_k \quad \text{ou} \quad \text{mín} \sum_{j=1}^J v_j - \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K v_{k,j} \quad [\text{Eq. 1 e 2}]$$

Para cada $j = 1:J$,

Sujeitos à

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I v_{k,i} - z_k = 0, \quad \forall k \in K, \quad \forall i \in V_h \quad [\text{Eq. A1}]$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I v_{k,i} \leq v, \quad \forall k \in K, \quad \forall i \in V_v \quad [\text{Eq. A2}]$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I p_{k,i} - s_k = 0, \quad \forall k \in V_k, \quad \forall i \in V_h \quad [\text{Eq. A3}]$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I p_{k,i} = 1, \quad \forall k \in V_k, \quad \forall i \in V_h \quad [\text{Eq. A4}]$$

$$x_{ki} \in \mathbb{Z}^{i*k}, \quad \forall 0 \leq x_{ki} \leq 1, \quad \forall i \in V_h, \quad \forall k \in K \quad [\text{Eq. A5}]$$

$$y_{ki} \in \mathbb{Z}, \quad \forall k \in K, \quad \forall i \in V_h \quad [\text{Eq. A6}]$$

$$z_k \in N^{i*k}, \quad \forall k \in K, \quad \forall i \in V_h \quad [\text{Eq. A7}]$$

em que: i – corresponde à posição h_i avaliada; j – corresponde à árvore avaliada; k – corresponde ao sortimento avaliada; I – valor máximo para o índice i , corresponde ao número máximo de seções em cada árvore j ; J – valor máximo para o índice j , corresponde ao número máximo de árvores avaliadas; K – valor máximo para o índice k , corresponde ao número de sortimentos utilizados para o traçamento das toras.

3.10.2 Função objetivo

O sistema de análise, simulação e otimização do sortimento possuem o objetivo principal de aumentar a receita obtida pelas operações de sortimento. Este ganho pode ser obtido de três maneiras: 1) uma redução dos resíduos de madeira na floresta, 2) um aumento do volume aproveitado devido ao sortimento otimizado, ou 3) alguma combinação dos fatores mencionados. A seguinte equação [01] maximiza a receita:

$$Receita_{k,j} = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K v_{k,j} * R_k \quad [01]$$

em que: $Receita_{k,j}$ é a receita bruta das árvores j traçadas segundo as dimensões estabelecidas para os sortimentos k ; $v_{k,j}$ indica quanto em volume do sortimento k foi utilizado da árvore j ; R_k é o valor monetário atribuído ao sortimento k .

A receita da função objetivo [01] é a receita bruta, ou seja, a soma dos volumes de cada tora multiplicadas pelo preço correspondente ao sortimento em questão. Em síntese, a receita foi obtida como a soma dos volumes $z_{k,j}$ (volume seccionado para o sortimento k da árvore j) que foram multiplicados pelos seus preços (R_k), coeficientes da matriz c .

$$\begin{matrix} \text{matriz } c & & \text{matriz solução} \\ [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ R_1 \ \dots \ R_k]_{(1,w)} & * & \begin{bmatrix} x_{kij} \\ \vdots \\ y_{kij} \\ \vdots \\ z_{kj} \end{bmatrix}_{(w,1)} \end{matrix}$$

em que: w – número de seções* número de sortimentos+2* número de sortimentos

Na matriz c , todos os coeficientes para a variável x_{kij} serão ‘zero’, pois a informação sobre a possibilidade de utilização das p_i seções não é necessária. Para a variável y_{kij} , que representa o número de toras para cada sortimento k , os coeficientes também serão ‘zero’ pois a função objetivo não deve contabilizar número de toras com as receitas dos sortimentos, caso isso ocorra a solução ótima irá priorizar a quantidade de resíduo devido a grandeza da variável.

A função objetivo irá maximizar as receitas obtidas para cada sortimento k utilizando os coeficientes da variável z_{kj} que correspondem ao valor do metro cúbico de cada sortimento (R_k).

De maneira análoga, podem ser consideradas outras expressões para a função objetivo. A equação [02], por exemplo, corresponde ao objetivo de minimização dos resíduos remanescentes na floresta.

$$Resíduo_{k,j} = \sum_{j=1}^J v_j - \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K v_{k,j} \quad [02]$$

em que: $Resíduo_{k,j}$ é o resíduo volumétrico das árvores j traçadas segundo as dimensões estabelecidas para os sortimentos k ; $v_{k,j}$ indica quanto em volume do sortimento k foi utilizado da árvore j ; v_j é o volume total da árvore j .

A solução da função objetivo [02] é o resíduo minimizado, ou seja, o volume total menos o volume aproveitado comercialmente. Neste caso, os volumes $z_{k,j}$ são multiplicados por “um” ($R_k = 1$), logo, o modelo não leva em consideração quanto que vale cada sortimento e busca apenas minimizar o resíduo.

Na matriz c , todos os coeficientes, tanto para a variável x_{kij} como y_{kij} serão ‘zero’, pois essas informações sobre a possibilidade de utilização das p_i secções ou número de toras por sortimento k possuem grandeza maior que a $z_{k,j}$ e não são relevantes para a minimização do resíduo.

3.10.3 Conjunto de restrições

Todas as questões práticas ligadas à implementação do MOS foram incorporadas como cinco restrições na matriz de parâmetros A , em que a ordem de entrada das restrições não afeta a solução ótima da função objetivo.

A1. Restrição - Volume utilizado por sortimento;

Somatório dos volumes por secção p_i utilizada para cada sortimento k deve ser igual a zero. Sendo, para cada $j = 1:J$,

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I v_{k,i} - z_k = 0$$

A4. Restrição - Somatório das seções p_i utilizadas para o sortimento k na árvore j , dentro da disponibilidade ($NS_{k,j}$), deve ser igual a 1;

Sendo, para cada $j = 1:J$,

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I p_{k,i} = 1$$

Essa é mais uma restrição de controle para não ocorrer sobreposição dos produtos, uma vez que uma seção for utilizada para o sortimento k , ela não será utilizada para os demais sortimentos.

$$\left| \begin{array}{ccc|ccc|c|ccc} p_{1,1} & & & p_{2,1} & & \dots & p_{k,1} & & \\ & p_{1,2} & & & p_{2,2} & & & p_{k,2} & \\ & & \ddots & & & \ddots & & & \ddots \\ & & & & & & & & p_{k,i} \\ & & & p_{1,i} & & p_{2,i} & & & p_{k,i} \end{array} \right| \begin{array}{l} = 1 \\ = 1 \\ = 1 \end{array}$$

A5. Restrição - Domínio da variável x_{kij} deve ser de números inteiros não negativos.

Uma matriz identidade de 'uns' com dimensão $i \times i^*k$ foi criada para atender essa condição.

$$x_{kij} \in Z^{i^*k}, \quad \forall 0 \leq x_{kij} \leq 1, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, (h_j/0,1)\}$$

Ao agrupar as sub-matrizes das restrições para dimensionar a matriz A, deve-se lembrar que as colunas serão multiplicadas por x_{kij} , y_{kij} ou z_{kj} , que poderão ser uma variável inteira ou contínua (Apêndice B). As demais células da matriz A deverão ser preenchidas com zeros.

3.10.4 Exemplo didático

Para fins didáticos, considerou-se uma árvore dividida em cinco seções p_i com um metro de comprimento cada. Neste exemplo foram considerados três sortimentos: para o sortimento A, d_{fina} de 30 cm e 2 metros de comprimento; sortimento B, d_{fina} de 20 cm e 3 metros de comprimento; e sortimento C, d_{fina} de 5 cm e 2 metros de comprimento. Desta forma, resultou a matriz de possibilidades NS , em que cada linha dessa matriz corresponde à possibilidade de cada sortimento k .

$$NS_{(k,i)} \begin{array}{l} \left| \begin{array}{ccccc} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{array} \right| \begin{array}{l} \rightarrow \text{Possibilidade de utilizar o sortimento A} \\ \rightarrow \text{Possibilidade de utilizar o sortimento B} \\ \rightarrow \text{Possibilidade de utilizar o sortimento C} \end{array} \end{array}$$

Neste exemplo, a seção $NS_{(k,3)}$ possui o d_{fina} necessário para ser utilizado tanto para o sortimento B como sortimento C.

E para a matriz de possibilidades NS , existe uma matriz resposta equivalente, denominada de X , que é submetida às restrições do modelo econômico. Assim, x_{23} corresponde ao uso da seção 3 para sortimento 2.

$$X_{(k,i)} \begin{array}{l} \left| \begin{array}{ccccc} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} & x_{15} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} & x_{25} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & x_{34} & x_{35} \end{array} \right| \begin{array}{l} \rightarrow \text{As linhas correspondem aos sortimentos} \\ \hookrightarrow \text{As colunas correspondem às seções} \end{array} \end{array}$$

A matriz X é reorganizada de forma que todos os $x_{(k,i)}$ sejam submetidos às todas as restrições, gerando desta forma uma equação 'resposta' para cada sortimento e seção.

A1. Primeira restrição

Essa restrição verifica o volume utilizado por sortimento. Adota-se como coeficientes da 'equação' o volume em m^3 de cada seção p_i , sendo os valores de $x_{(k,i)}$ uma variável binária, representando se o volume dessa seção p_i foi utilizado ou não para o sortimento k . Os volumes fictícios das seções p_i , sentido base-ápice, são $0,13 m^3$; $0,09 m^3$; $0,06 m^3$; $0,03 m^3$; e $0,01 m^3$.

É acrescentada uma coluna para a variável z_k , responsável pela quantificação do volume por sortimento. Os coeficientes para z_k correspondem a -1 , de forma que o somatório dos volumes utilizados por sortimento k seja igual a zero. Desta forma, obtém-se a matriz A1:

$$0,13 * x_{11} + 0,09 * x_{12} + 0,06 * x_{13} + 0,03 * x_{14} + 0,01 * x_{15} - 1z_1 = 0$$

$$0,13 * x_{21} + 0,09 * x_{22} + 0,06 * x_{23} + 0,03 * x_{24} + 0,01 * x_{25} - 1z_2 = 0$$

$$0,13 * x_{31} + 0,09 * x_{32} + 0,06 * x_{33} + 0,03 * x_{34} + 0,01 * x_{35} - 1z_3 = 0$$

A2. Segunda restrição

Nesta restrição é verificado se o valor do somatório dos volumes das seções p_i utilizados por sortimento k é menor ou igual ao volume total da árvore. Desta forma, garante que o volume das seções não seja quantificado mais de uma vez. Para este exemplo, o volume total da árvore é $0,32 \text{ m}^3$:

$$0,13 * x_{11} + 0,09 * x_{12} + 0,06 * x_{13} + 0,03 * x_{14} + 0,01 * x_{15} + 0,13 * x_{21} + 0,09 * x_{22} \\ + 0,06 * x_{23} + 0,03 * x_{24} + 0,01 * x_{25} + 0,13 * x_{31} + 0,09 * x_{32} + 0,06 \\ * x_{33} + 0,03 * x_{34} + 0,01 * x_{35} \leq 0,32 \text{ m}^3$$

A3. Terceira restrição

O objetivo desta restrição é garantir que o modelo respeite o comprimento máximo para cada sortimento. Nesta etapa é acrescentada uma coluna para a variável $y_{(k,i)}$, responsável pela quantificação dos sortimentos. Com sinal negativo, os coeficientes para $y_{(k,i)}$ correspondem à quantidade de seções p_i aceitas para cada sortimento, em negativo, de forma que o somatório das seções p_i utilizadas por sortimento k seja igual a zero. Reiterando que a variável $x_{(k,i)}$ é uma variável binária, sendo 1, quando utilizada a seção p_i para o sortimento k .

$$x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} - 2y_1 = 0$$

$$x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} + x_{25} - 3y_2 = 0$$

$$x_{31} + x_{32} + x_{33} + x_{34} + x_{35} - 2y_3 = 0$$

Considerando que cada seção p_i possui um metro de comprimento, e o comprimento para os sortimentos A, B e C são 2 m, 3 m e 2 m, respectivamente, os coeficientes para $y_{(k,i)}$ são -2, -3 e -2.

A4. Quarta restrição

Esta também é uma restrição de controle para que não haja sobreposição das seções p_i , ou seja, cada seção p_i só pode ser utilizada uma vez. O somatório das seções p_i utilizadas para o sortimento k é igual a 1, respeitando sua possibilidade de utilização ($NS_{k,i}$).

$$NS_{(5,3)}^t \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} & x_{15} \\ x_{21} & x_{22} & x_{13} & x_{14} & x_{15} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & x_{34} & x_{35} \end{bmatrix} = \begin{matrix} x_{11} & x_{21} & x_{31} & = & 1 \\ x_{12} & x_{22} & x_{32} & = & 1 \\ 0 & x_{23} & x_{33} & = & 1 \\ 0 & 0 & x_{34} & = & 1 \\ 0 & 0 & x_{35} & = & 1 \end{matrix}$$

A5. Restrição

Esta restrição considera o domínio da variável $x_{(k,i)}$ que deve ser de números binários inteiros não negativos. E para isso, utiliza-se uma matriz identidade de ‘uns’ com dimensão $i \times i^*k$.

1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1

Cada uma das sub-matrizes de restrições são rearranjadas para dimensionar a matriz A, lembrando que as demais células da matriz A devem ser preenchidas com zeros. Desta forma, obtém-se a matriz de restrições A:

	11	12	13	14	15	y1	21	22	23	24	25	y2	31	32	33	34	35	y3	z1	z2	z3	
	0,13	0,09	0,06	0,03	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	
A1	0	0	0	0	0	0	0,13	0,09	0,06	0,03	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,13	0,09	0,06	0,03	0,01	0	0	0	0	-1
A2	0,13	0,09	0,06	0,03	0,01	0	0,13	0,09	0,06	0,03	0,01	0	0,13	0,09	0,06	0,03	0,01	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A3	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	-3	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
A4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A5	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0

A receita da função objetivo [01] é a receita bruta, ou seja, a soma dos volumes de cada tora multiplicadas pelo preço correspondente ao sortimento em questão. Neste exemplo, os sortimentos A, B e C possuem os valores de R\$ 100,00, R\$ 60,00, e R\$ 30,00 por m³ respectivamente. Portanto, têm-se os seguintes coeficientes para a função objetivo:

matriz c

$$= |0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 100 \ 60 \ 30|_{(1,21)}$$

Obtendo-se a seguinte solução ótima:

Máx.

$$= |1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0,22 \ 0,00 \ 0,09|$$

Uma tora para o sortimento A com 0,22 m³ e uma tora para o sortimento C com 0,09 m³, totalizando a receita de R\$ 24,70 e resíduo de 0,01 m³.

No caso da função objetivo [02], considera-se todos os sortimentos com o mesmo valor por m³. Desta forma, a função irá encontrar a solução ótima para o maior aproveitamento do fuste e, conseqüentemente, a minimização do resíduo.

matriz c

$$= |0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1|_{(1,21)}$$

Obtendo-se a seguinte solução ótima:

Mín.

$$= |0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0,00 \ 0,28 \ 0,04|$$

Uma tora para o sortimento B com 0,28 m³ e uma tora para o sortimento C com 0,04 m³, totalizando a receita de R\$ 18,00 e nenhum resíduo.

3.10.5 Cenários

Os cenários foram construídos com a finalidade de simular a otimização de sortimentos para dados provenientes da distribuição de diâmetros estimada pelo sistema de equação que compõe o modelo de distribuição diamétrica para *Tectona grandis* proposto por Favalessa [2018] (Tabela 15).

Tabela 15 – Sistema de equação que compõe o modelo de distribuição diamétrica para *Tectona grandis* L.f.

Variável	Equação
Altura dominante (m)	$h_{100} = 28,85 * (1 - e^{-0,1165*t})$
Diâmetro médio quadrático (cm)	$dg = 2,48037 + 0,7739 * h_{100} + 0,5077 * t - 0,3684 * IPA_{h100}$
Número de árvores (árv.ha ⁻¹)	$N = N_0 + N_0 * \begin{bmatrix} (0,1947 - 0,074 * dg + 0,0454 * h_{100}) * I_1 + \\ (-0,2266 - 0,049 * dg + 0,0252 * h_{100}) * I_2 + \\ (-0,5117 - 0,0139 * dg + 0,00701 * h_{100}) * I_3 \end{bmatrix}$
Área Basal (m ² .ha ⁻¹)	$G = \left(\frac{\pi * dg^2}{40000} \right) * N$
Diâmetro mínimo (cm)	$d_{min} = -3,9839 + 1,0445 * dg - 0,005 * G * h_{100}$
Diâmetro máximo (cm)	$d_{max} = 1,0284 + 1,1653 * dg + 0,012 * G * h_{100}$
Parâmetro de escala	$b = -5,1359 + 1,02856 * dg + 0,04021 * (d_{max} - d_{min})$
Parâmetro de forma	$c = e^{(0,8634 - 0,8619 * \ln(\frac{d_{max} - d_{min}}{dg}) + 0,00765 * h_{100} + 0,0187 * G)}$

Legenda: t – idade, em anos; IPA_{h100} – incremento periódico anual em altura dominante, m.ha⁻¹.ano; N_0 – densidade inicial, em árvores por hectares; I_k – restrições do modelo em que: $I_1 = 1$, se $dg \leq 16$ cm; $I_2 = 1$, se 16 cm < $dg \leq 24,4$ cm; e $I_3 = 1$, se $24,4$ cm < $dg \leq 27$ cm.

Fonte: Adaptado de Favalessa [2018].

No primeiro cenário foram estimadas as frequências nas classes de diâmetro para desbastes aos cinco, oito e onze anos em um povoamento de *Tectona grandis*. Desta forma, fornecer os resultados tanto para maximizar a renda como para maximizar o volume, subsidiando assim decisões sobre qual combinação de sortimentos atende ao interesse do produtor.

Para o segundo cenário foram estimadas as frequências nas classes de diâmetro aos 16 anos simulando o corte raso em diferentes sítios – bom, intermediário e ruim – 17, 21 e 25 metros, respectivamente. Logo, é possível comparar o efeito dos diferentes sítios na destinação da produção de um povoamento de *Tectona grandis*.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ESTUDO DESCRITIVO DA FORMA DO FUSTE

Preliminarmente ao estudo descritivo dos pontos de mudança de forma (PMF) no fuste, foi realizado o ajuste do modelo de Schöepfer (1966) para gerar as derivadas da função e identificar o ponto de mudança da forma. A equação descrita apresentou todos os coeficientes significativos, com as estatísticas coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) de 0,97 e erro padrão da estimativa em percentagem ($S_{yx}\%$) de 9,63%, mas não atendeu nenhuma das condicionantes de regressão. Embora não tenha atendido aos testes de independência dos resíduos de Durbin-Watson, homocedasticidade de White e normalidade dos resíduos de Kolmogorov-Smirnov, a equação foi utilizada para determinar os PMF afim de estudar as possíveis alterações no modelo de Clark III et al. (1991).

$$d_{ij} = d_j * \left[\begin{array}{l} 1,2768 - 5,658 * \left(\frac{h_{ij}}{h_j}\right) + 24,2408 * \left(\frac{h_{ij}}{h_j}\right)^2 - 50,4129 * \left(\frac{h_{ij}}{h_j}\right)^3 \\ + 46,499 * \left(\frac{h_{ij}}{h_j}\right)^4 - 15,9309 * \left(\frac{h_{ij}}{h_j}\right)^5 \end{array} \right]$$

em que: d_j – diâmetro à altura do peito da árvore j , em cm; d_{ij} – diâmetro relativo à posição i da árvore j , em m; $d_{5,3j}$ – diâmetro mensurado à 5,3 metros de altura da árvore j , em cm; h_j – altura da árvore j , em m; h_{ij} – altura relativa à posição i da árvore j , em m.

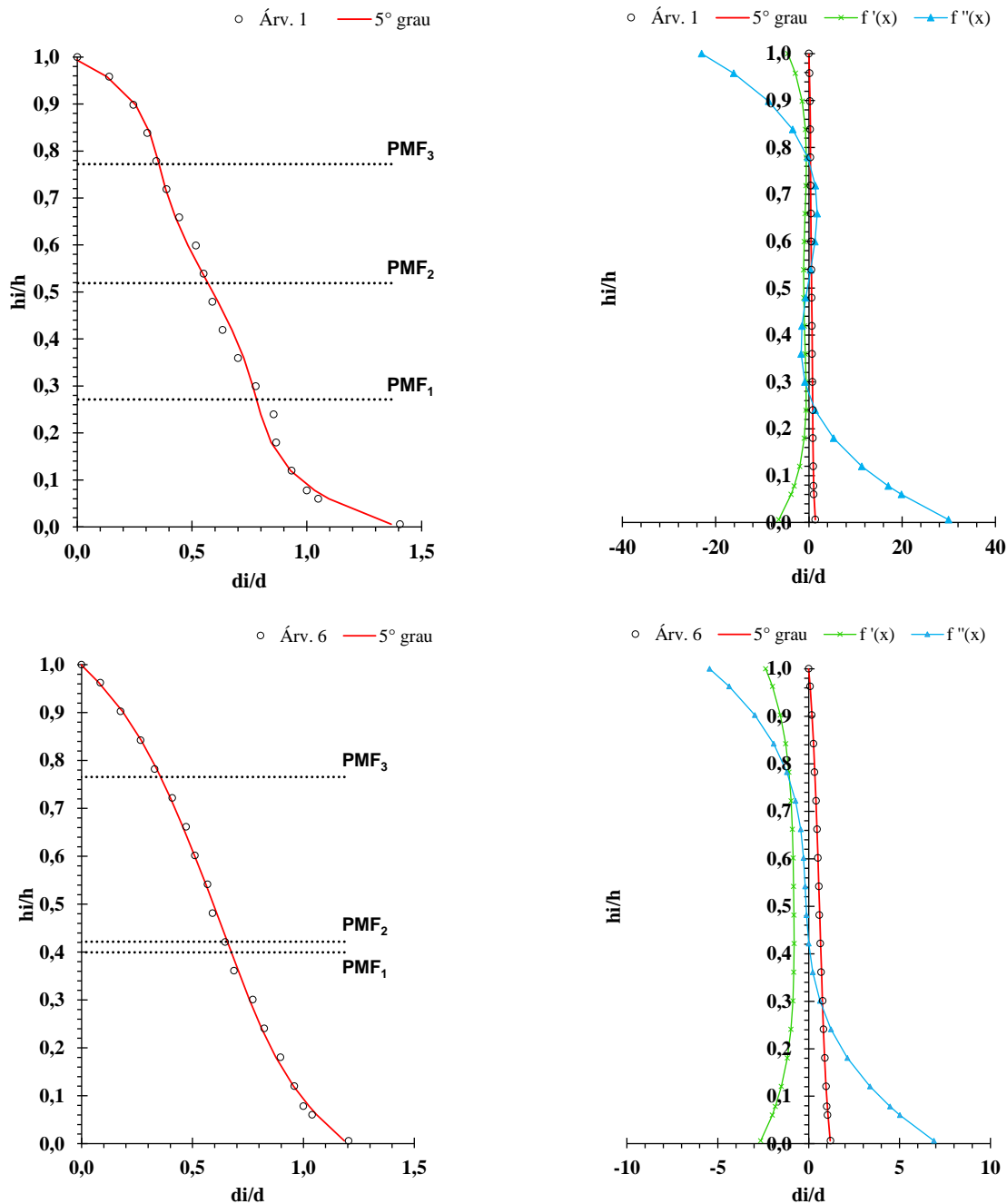
Fonte: o autor.

A partir das derivadas, verificou-se funções com três pontos de inflexão e que possuem também três PMF's, podendo ser três pontos de inflexão reais, como a árvore 1; dois pontos de inflexão reais e um imaginário (PMF₃), como a árvore 6; e um ponto de inflexão real e dois imaginários, não verificado no presente estudo (Figura 7).

Em árvores do estrato médio ou dominadas em povoamentos densos, ou seja, árvores submetidas à competição, esperam-se fustes mais cilíndricos com poucos PMF's (ASSMANN, 1970). Porém a *Tectona grandis* possui ramificação vigorosa, formando copa globosa aberta e sistema radicular superficial, permitindo que o tronco seja dotado ou não de raízes tabulares (SIQUEIRA, 2017), podendo essas características serem intensificadas pelas condições do povoamento. Desta forma, sob essas características,

os modelos segmentados devem oferecer melhores estimativas das dimensões do fuste para a espécie.

Figura 7 – Derivadas da função de Schöepfer (1966) - 5° grau - para identificar os pontos de mudança de forma (PMF) do fuste de *Tectona grandis* L.f., 2018



Legenda: hi/h – razão entre a altura na posição i (h_i) e altura (h); di/d – razão entre o diâmetro na posição i (d_i) e o diâmetro à altura do peito (d); $f'(x)$ – primeira derivada da função x ; $f''(x)$ – segunda derivada da função x .

Fonte: o autor.

Os resultados do estudo dos PMF's para os fustes de cada árvore foram apresentados em valores mínimos, médios e máximos de DAP e altura por classe diamétrica no Apêndice C. Ao analisar a média dos PMF's, verificou-se que os mesmos se encontram distribuídos de forma proporcional ao longo do fuste.

Até os 28% da altura, a porção inferior do fuste pode ser descrita por um neiloide, forma que decresce fortemente por efeito das raízes tabulares, geralmente verificada no quinto inferior das árvores (PRODAN et al., 1997). A porção intermediária, de 28% até 57% da altura pode ser descrita por um parabolóide, e dos 57% até 73% da altura por um parabolóide ou suave neiloide, sendo possível caracterizar os pontos de ramificação da copa globosa aberta da espécie. O ápice, acima dos 73% da altura, pode ser descrito por uma parábola quadrática ou um cone.

4.2 AJUSTE DOS MODELOS DE AFILAMENTO SEM ESTRATIFICAÇÃO

De modo geral, equações não segmentadas, segmentadas e de forma variável apresentaram ajuste aos dados da espécie (Tabela 16). As exceções foram as equações de Kozak (b) (1969), Kozak (c) (1969), Demaerschalk (d) (1973), Demaerschalk (e) (1973) e Parresol et al. (1987) que não convergiram, além das equações de Demaerschalk (b) (1973) e Cao et al. (1980) (reescrita por BYRNE; REED, 1986), que apresentaram matriz Hessiana singular, sendo estas equações descartadas do estudo.

A Matriz Hessiana singular (nome dado em homenagem ao seu inventor, matemático alemão Ludwig Hesse) ocorre quando as segundas derivadas parciais, em relação aos parâmetros do modelo, resultam em negativas e, portanto, tornam a matriz não inversível, não sendo possível calcular a matriz de variância. Esse estado "singular" ocorre para algumas combinações de conjuntos de dados e modelos, e nenhum processo computacional pode torná-la invertível, dado o modelo e os dados escolhidos, já que o inverso desejado não existe (GILL; KING, 2004).

Apenas as equações de forma variável, Kozak (1988), Kozak (a) (2004) e Kozak (b) (2004) apresentaram coeficientes não significativos a 5% de probabilidade de erro, não sendo considerados para a continuidade do estudo (Tabela 16). Para as mesmas

foram propostas modificações excluindo os respectivos coeficientes não significativos, o que resultou na significância dos coeficientes remanescentes.

Em geral, as estimativas foram melhores nas equações segmentadas e de forma variável, seguidas das equações não segmentadas (Tabela 17). Com o resultado se comprova a hipótese do item 4.1, em que as funções segmentadas seriam mais eficientes para descrever o afilamento dos fustes de *Tectona grandis*.

Os resultados da estatística $S_{yx}\%$, relativos ao erro médio das estimativas, são inferiores a 15% para todas as equações, sendo os valores médios mais acurados obtidos nos modelos segmentados (7,25%) e de forma variável (8,53%). Para a estatística R^2_{aj} , foram alcançados valores superiores a 94% para todas as equações, indicando estimativas apropriadas dos d_i ao longo do fuste.

Figueiredo Filho et al. (1996), Assis et al. (2001), Müller et al. (2014) e Môra (2015), em estudos com os modelos de Clark III et al. (1991), Max e Burkhardt (1976), Demaerschalk (1972), Kozak et al. (b) (1969) e/ou Schöpfer (1966), para outras espécies, também encontraram melhores estimativas nas equações segmentadas em relação às não segmentadas.

As funções segmentadas, tanto para os gráficos do resíduo percentual em função do d_i estimado, como nos gráficos em função da relação altura na posição i pela altura (h_i/h), aparentemente, foram melhores que as demais (Apêndices D e E). Entretanto, todas as equações apresentaram alguma tendenciosidade ao longo da linha de estimativa, principalmente a tendência de subestimar os maiores diâmetros. Os maiores erros geralmente ocorreram nas extremidades do fuste, onde os resíduos variaram, em média, de -12 a 22 cm.

Nenhuma das equações atendeu às condicionantes de regressão, portanto, verificou-se as que apresentaram melhores estatísticas de ajuste e precisão, Clark III et al. (1991), Kozak (1988) modificada e Kozak (b) (2004) modificada, R^2_{aj} superior ou igual a 0,98 e $S_{yx}\%$ inferior ou igual a 9%, para análise gráfica mais detalhada da distribuição dos resíduos. A equação selecionada para dar continuidade ao estudo foi submetida a estratificações e ajustada com efeitos aleatórios.

Tabela 16 – Parâmetros estimados no ajuste dos modelos de afilamento sem estratificação dos dados de *Tectona grandis* L. f., região centro-sul do estado de Mato Grosso

MODELO	COEFICIENTES									
	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	β_9
NÃO-SEGMENTADO										
Schöpfer (1966)	1,2768*	-5,6580*	24,2408*	-50,4129*	46,4990*	-15,9309*				
Kozak et al. (a) (1969)		-2,2190*	1,0246*							
Omerod (1973)		0,8412*								
Demaerschalk (1972)	0,1820*	0,9130*	0,8884*	-0,8953*						
Demaerschalk (a) (1973)	1,1854*	1,7782*								
Demaerschalk (c) (1973)	8686,5*	40,6652*	1,0894*	1,6578*						
SEGMENTADO										
Max e Burkhart (1976)	0,0868*	0,7133*	-2,9360*	1,4108*	113,1*	-1,2030*				
Clark III et al. (1991)	40,8746*	8,5873*	0,8979*	928,1*	0,6549*	1,8060*				
FORMA VARIÁVEL										
Kozak (1988)	1,0913*	0,9616*	0,9989*	0,3204*	-0,1773*	-0,3937 ^{ns}	0,2919*	0,0554*		
Kozak (1988) modificado	1,0855*	0,9634*	0,9989*	0,4801*	-0,2150*		0,0825*	0,0571*		
Kozak (a) (2004)	1,3314*	0,9803*	0,5216*	-0,0476 ^{ns}	0,0244*	-0,2507*				
Kozak (a) (2004) modificado	1,3454*	0,9773*	0,5108*		0,0251*	-0,2680*				
Kozak (b) (2004)	1,1072*	0,9527*	0,0209 ^{ns}	0,7594*	-1,2871*	-0,0085*	1,0340*	2,5195*	0,1450*	-1,5733*
Kozak (b) (2004) modificado	1,1399*	0,9631*		0,7546*	-1,3218*	-0,0087*	1,0101*	2,7974*	0,1490*	-1,5665*
Bi (2000)	28,5050*	-13,4900*	-2,1293*	-15,0338*	1,0452*	-14,9931*	9,7580*			
Lee et al. (2003)	1,6999*	0,9074*	4,1225*	-5,7147*	2,8530*					

em que: ^{ns} – não significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro; * – significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Fonte: o autor.

Tabela 17 – Estatísticas de ajuste e precisão para os modelos de afilamento sem estratificação dos dados de *Tectona grandis* L. f., região centro-sul do estado de Mato Grosso

MODELO	SQRes	S _{yx} %	R ² _{aj.}
NÃO-SEGMENTADO			
Schöepfer (1966)	11378,8	9,63	0,97
Kozak et al. (a) (1969)	22940,1	13,67	0,95
Omerod (1973)	24617,8	14,16	0,94
Demaerschalk (1972)	22492,0	13,54	0,95
Demaerschalk (a) (1973)	23764,0	13,92	0,94
Demaerschalk (c) (1973)	18077,2	12,14	0,96
SEGMENTADO			
Max e Burkhart (1976)	10658,6	9,33	0,97
Clark III et al. (1991)	6447,5	7,25	0,98
FORMA VARIÁVEL			
Kozak (1988) modificado	8906,2	8,53	0,98
Kozak (a) (2004) modificado	11415,0	9,65	0,97
Kozak (b) (2004) modificado	9054,2	8,60	0,98
Bi (2000)	18587,1	12,32	0,96
Lee et al. (2003)	11378,8	9,63	0,97

em que: SQRes – soma de quadrado dos resíduos; S_{yx}% - erro padrão da estimativa em porcentagem; R²_{aj.} – coeficiente de determinação ajustado.

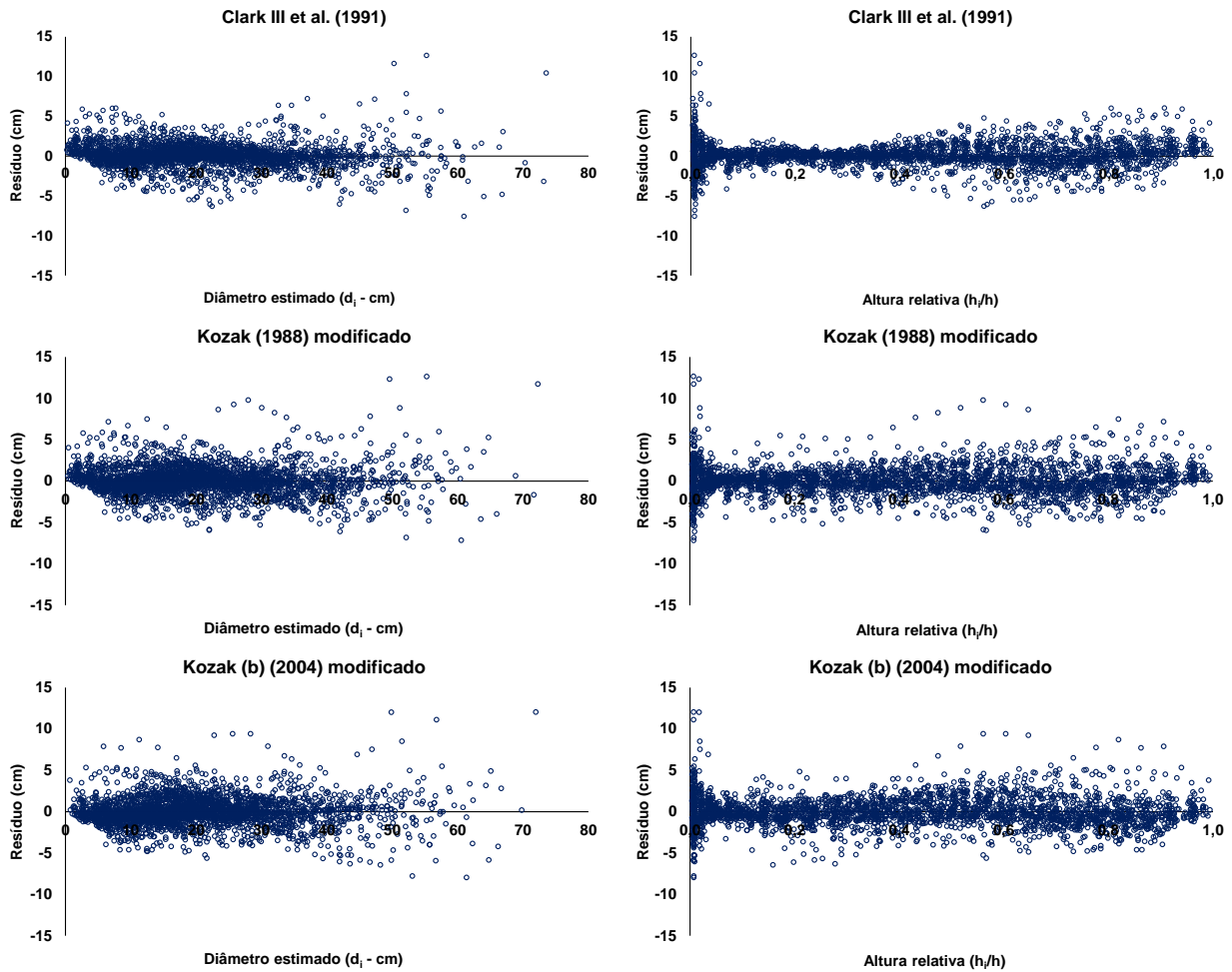
Fonte: o autor.

Uma vez que o banco de dados contém medições repetidas em cada árvore - ou seja, dados hierárquicos - dentro da árvore a variância é heterogênea e a correlação entre os resíduos viola as premissas básicas (ÖZÇELIK et al., 2011). Entretanto, a modelagem não linear de efeito misto possui a vantagem de permitir a modelagem da heteroscedasticidade e autocorrelação de um modelo de efeitos mistos (PINHEIRO; BATES, 2000), e cada vez mais vem sendo utilizada na Engenharia Florestal (de-MIGUEL et al., 2012; FANG; BAILEY, 2001; GARBER; MAGUIRE, 2003; LEITES; ROBINSON, 2004; MÔRA, 2015; TASISSA; BURKHART, 1998; TRINCADO; BURKHART, 2006).

A equação de Clark III et al. (1991) apresentou erro com variação entre -7,55 a 12,66 cm (Figura 8), mas com distribuição de resíduos mais homogênea na porção média do fuste quando comparada com as geradas pelas equações de Kozak (1988) modificada

e Kozak (b) (2004) modificada. O modelo de Clark III et al. (1991) é o mais preciso porque pode explicar as diferenças na forma de fuste quando o diâmetro à 5,3 metros é mensurado e quando comparado aos demais modelos segmentados; estima-se volumes em alturas acima de 5,3 metros igualmente bem, mas oferece as melhores estimativas de volume na base do fuste, sortimentos melhor remunerados (CLARK III et al., 1991).

Figura 8 – Distribuição dos resíduos em função dos diâmetros estimados ao longo do fuste (d_i) e em função da relação altura na posição i pela altura (h_i/h) para os modelos de Clark III et al. (1991), Kozak (1988) modificado e Kozak (b) (2004) modificado sem estratificação dos dados para *Tectona grandis* L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso



Fonte: o autor.

Estimativas insatisfatórias nos extremos superior (85% a 95% da altura) e inferior (1% da altura) também foram reportadas por Assis et al. (2001) em estudo com *Pinus taeda* com modelos segmentados e não segmentados. Figueiredo Filho et al. (1996) também observaram erros semelhantes nas extremidades e, apesar do desempenho inadequado nos 10% superiores do tronco, recomendaram o modelo de Clark III et al. (1991) para descrever o perfil do fuste e predizer o volume do tronco de *Pinus taeda*.

4.3 ESTRATIFICAÇÃO COMO REDUTOR DA VARIABILIDADE NO AJUSTE DE MODELOS

A generalização da base de dados aumenta a variabilidade das estimativas, o que implica em estimativas menos acuradas dos diâmetros, quando contrastados com as estimativas dos ajustes estratificados. A recomendação de ajustes de funções de afilamento por classe diamétrica condiz com os resultados encontrados por Fischer (1997) e Assis et al. (2001) para *Pinus taeda*, por Müller (2004) para *Eucalyptus grandis* e Favalessa et al. (2012a) para *Tectona grandis*; por classe de quociente de forma (K) encontrado por Souza (2009) para *Pinus taeda*; por classe de idade encontrado por Friedl (1989) e Figueiredo Filho et al. (2015) para povoamentos de *Araucaria angustifolia* e Kohler et al. (2015) para *Pinus taeda*.

A equação de Clark III et al. (1991) convergiu para todas as classes de DAP, porém, para as primeiras duas classes apresentou o problema de matriz Hessiana singular (Apêndice F). As classes apresentaram muitos coeficientes não significativos e os ajustes não atenderam a todas as condicionantes de regressão. Em geral, essa estratificação proporcionou resultados para $R^2_{aj.}$ e $S_{yx}\%$ semelhantes ao do ajuste para o conjunto total dos dados. Para algumas classes não foram verificados ganhos em ajuste e precisão como, por exemplo, na classe 10 que apresentou $R^2_{aj.}$ de 0,99 e $S_{yx}\%$ de 9,3%, resultados que não superam ao do ajuste sem estratificação ($R^2_{aj.} = 0,98$; $S_{yx}\% = 7,25\%$).

Desempenho semelhante também foi verificado por Favalessa et al. (2012a) estudando *Tectona grandis* na mesma região, tanto para os modelos segmentados como os não segmentados, em que algumas classes de DAP mostraram valores de $S_{yx}\%$

superiores e R^2_{aj} , semelhantes aos do ajuste com o conjunto total de dados. Souza (2009) salienta que para estimativas em pontos mais distantes da base do fuste, região de maior deformidade, a separação dos dados em classes de DAP não traz efeitos, sendo inferior até mesmo aos dados não estratificados.

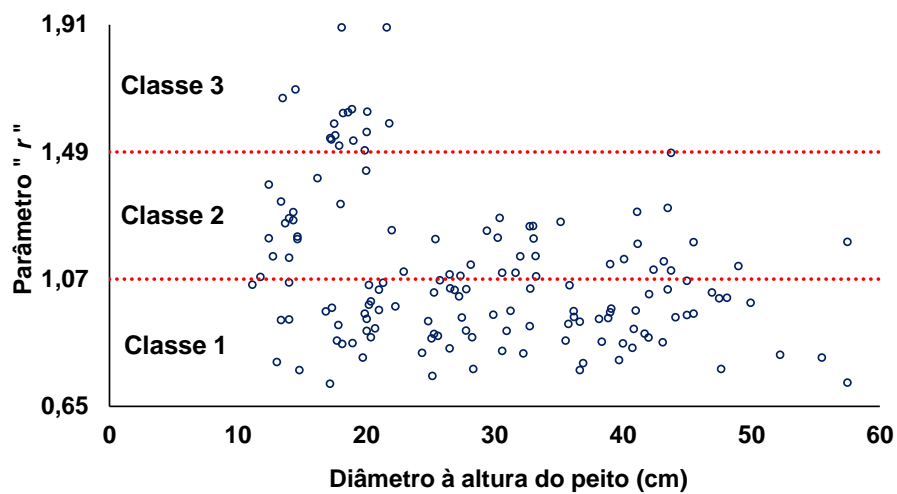
De modo geral, tanto os resultados da estratificação por classe de parâmetro “ r ” como por fator de forma artificial ($f_{1,3}$) foram melhores que os obtidos com a estratificação por classe de DAP (Apêndice F). O modelo convergiu em todas as classes e todos os coeficientes foram significativos ao nível de 5% de probabilidade de erro, mas, como anteriormente, não atenderam à todas condicionantes de regressão. E da mesma forma, como na estratificação por classe de DAP, também não foram verificados ganhos em ajuste e precisão, apresentou redução máxima de 1,4%.

A análise das distribuições das variáveis $f_{1,3}$ e parâmetro “ r ” em função do DAP, mostrou para o parâmetro r não existir uma tendência clara na distribuição dos valores em função do diâmetro; bem como os valores de $f_{1,3}$ apresentaram forte variabilidade nas mesmas classes (Figuras 9 e 10). A ausência de ganhos expressivos de acurácia, com as duas estratificações de dados, pode ser atribuída à tendência de os valores estarem distribuídos paralelos ao eixo das abscissas. Dentre as estratificações propostas, a classe de $f_{1,3}$ apresentou melhor resultado, e quando comparado ao da estratificação por classe de DAP, este se justifica pela diminuição da variação dentro das classes de $f_{1,3}$, uma vez que, para uma única classe de DAP podem existir diferentes formas de fuste.

O resultado pode ser explicado pelo fato de a forma da árvore ser afetada pelo crescimento e pelo ambiente (FINGER et al., 1995), logo, árvores de mesma classe de DAP não necessariamente possuem mesma forma geométrica, dado que essas classes são elaboradas de forma arbitrária ou de acordo com demandas de produtos (SOUZA, 2009). Em contrapartida, os $f_{1,3}$ levam em consideração as variações de DAP e de altura e, por isso, representam melhor a forma desta.

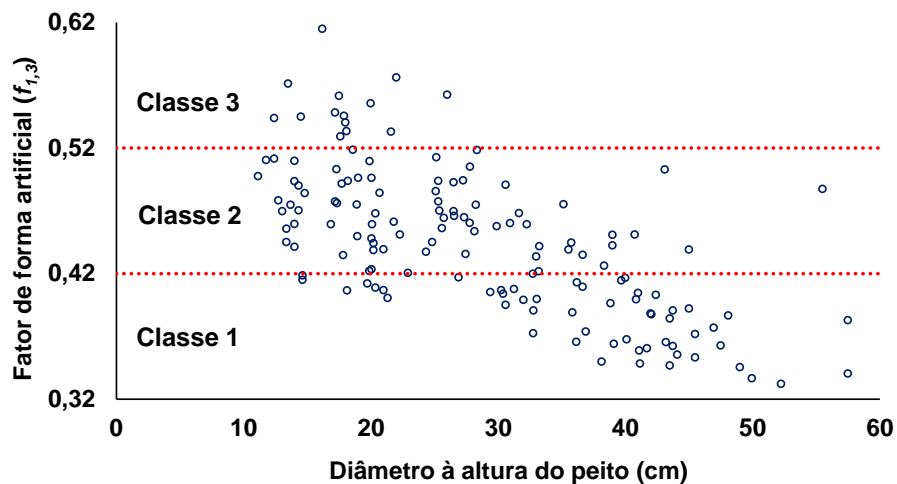
Mesmo que a estratificação em classe $f_{1,3}$ tenha apresentado ganhos no ajuste com a equação de Clark III et al. (1991), esta não pode ser proposta como estratégia mais adequada. Com base na dificuldade da classificação do $f_{1,3}$ das árvores em campo, as reduções do $S_{yx}\%$ não justificam a utilização da estratificação.

Figura 9 – Estratificação da variável parâmetro “ r ” em função do diâmetro à altura do peito para os dados de *Tectona grandis* L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso



Fonte: o autor.

Figura 10 – Estratificação da variável fator de forma artificial em função do diâmetro à altura do peito para os dados de *Tectona grandis* L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso



Fonte: o autor.

4.3.1 Modificações propostas ao modelo de Clark III et al. (1991)

Considerando todas as modificações implementadas na equação de Clark III et al. (1991), com exceção da modificação 3, que utilizou o diâmetro a 6,4 metros de altura ao invés do diâmetro a 5,3 metros ($d_{5,3j}$) e apresentou Matriz Hessiana singular, a redução do $S_{yx}\%$ foi inferior a 0,2% (Tabela 18).

A exclusão dos componentes β_3/d_j^3 (modificação 1) e $\beta_2+\beta_3/d_j^3$ (modificação 2) alterou a descrição da porção inferior do fuste, reduzindo a flexibilidade da equação. Ao comparar as estatísticas $S_{yx}\%$ e R^2_{aj} com a equação originalmente proposta por Clark III et al. (1991), verifica-se que as modificações 1 e 2 foram inferiores na predição dos d_{ij} ao longo do fuste para a *Tectona grandis*.

Tabela 18 – Parâmetros estimados e estatísticas de ajuste e precisão obtidas no ajuste do modelo de Clark III et al. (1991) e das modificações propostas para o mesmo, *Tectona grandis* L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso

Modelo	Coeficientes							SQRes	$S_{yx}\%$	R^2_{aj}
	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6			
Modelo Clark III et al. (1991)	40,8747*	8,5872*	0,8979*	928,2*	0,6551*	1,8062*		6449,6	7,25	0,98
Modificação 1	41,8367*	8,5873*	0,9428*		0,6549*	1,8060*		6500,3	7,28	0,98
Modificação 2	47,2651*	8,5873*			0,6549*	1,8060*		6512,1	7,29	0,98
Modificação 3	matriz hessiana									
Modificação 4	40,8748*	7,7990*	0,8979*	928,1*	0,6025*	1,7193*		6378,8	7,21	0,98
Modificação 5	40,8749*	8,5873*	0,8979*	928,1*	0,6275*	1,7066*	0,0830*	6358,2	7,20	0,98
Modificação 6	40,8749*	7,7990*	0,8979*	928,1*	0,5484*	1,5649*	0,3480*	6118,4	7,07	0,99
Modificação 7	40,8748*	8,5873*	0,8979*	928,1*	0,6098*	1,6463*	0,0169*	6252,9	7,14	0,99
Modificação 8	40,8748*	7,7990*	0,8979*	928,1*	0,5480*	1,5635*	0,0201*	6139,3	7,08	0,99

em que: * – significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro; SQRes – soma de quadrado dos resíduos; $S_{yx}\%$ - e erro padrão da estimativa em porcentagem; R^2_{aj} – coeficiente de determinação ajustado.
Fonte: o autor.

Novas modificações foram realizadas com base no estudo dos PMF's (item 4.1). A modificação 4, que utilizou o diâmetro à 28% da altura ($d_{28\%}$) ao invés do $d_{5,3j}$, e a modificação 5, que incluiu o coeficiente β_6 com o diâmetro à 73% da altura ($d_{73\%}$) no modelo de Clark III et al. (1991), proporcionaram redução no $S_{yx}\%$ de 0,05%. A análise gráfica da dispersão dos resíduos pelo d_i estimado (Apêndice G) não mostrou ganho

expressivo que justifique estas modificações nas posições de medição no tronco das árvores.

A modificação 6, que substitui o $d_{5,3j}$ pelo $d_{28\%}$ e acrescenta $\beta_6 * d_{73\%}$, foi a que alcançou melhores ganhos ao ajuste. Ao segmentar o modelo de Clark III et al. (1991) nas posições reais de mudança de forma da espécie a equação conseguiu descrever o fuste mais adequadamente. Entretanto, quando analisado os gráficos de dispersão dos resíduos, não existe diferença entre o modelo de Clark III et al. (1991) original com esta e as demais modificações.

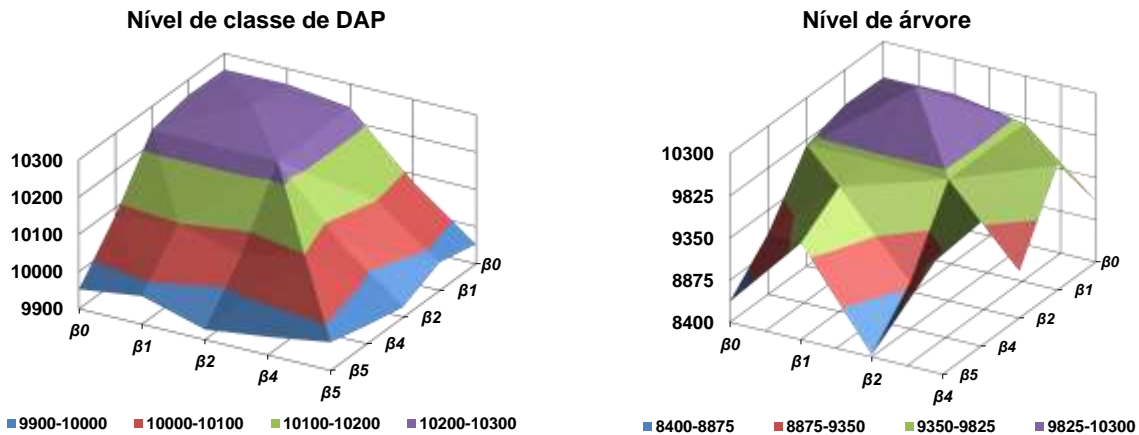
Ao utilizar o inverso da relação altura pelo DAP (d_i/h) como descritor do fuste em função do comprimento da copa, modificações 7 e 8, melhorou o ajuste. A modificação 8, substituição do $d_{5,3j}$ pelo $d_{28\%} + \beta_6 * 1/hd_j$, obteve redução de 0,17%. Entretanto, reduções no erro desta magnitude, não justificam a implementação de qualquer uma das modificações em campo.

4.4 MODELO DE EFEITO MISTO NÃO LINEAR

A inclusão de coeficientes de efeito fixo e aleatórios, em relação à classe de DAP e em relação à árvore, proporcionaram a convergência na maioria dos modelos gerados (Apêndice H). A análise da estatística de BIC demonstra redução com os ajustes considerando tanto a classe de DAP como a árvore com a inclusão do coeficiente β_5 , o qual descreve a posição superior do fuste (Figura 11).

Em relação à classe de DAP e em relação à árvore, com o efeito apenas no coeficiente β_5 , as equações apresentaram grande dispersão nos maiores diâmetros, variando entre -7,55 a 12,66 cm (Apêndice I). Ao acrescentar o efeito no coeficiente β_2 , um dos coeficientes que descreve a base do fuste – elevada variabilidade pela presença de raízes tabulares -, melhora as estimativas na porção inferior do fuste. Sendo mais eficiente em relação à árvore, onde com os efeitos no β_2 e β_5 os resíduos variaram de -4,13 a 5,13 cm.

Figura 11 – Estatística do critério de informação Bayesiano de Schwarz para o ajuste do modelo de Clark III et al. (1991) com a combinação de efeitos fixos e um efeito aleatório e para a combinação de efeitos fixos e dois efeitos aleatórios, em nível de classe de diâmetro (DAP) e em nível de árvore, *Tectona grandis* L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso, 2018



Fonte: o autor.

As reduções do $S_{yx}\%$ foram mais expressivas quando aplicado o efeito aleatório em relação à árvore. Com apenas um efeito, a redução foi de 1,5% e com dois efeitos reduziu 2,9% (Tabela 19). Porém, a análise da dispersão dos resíduos pelo d_i estimado evidencia que as equações continuam apresentando tendenciosidade ao longo da linha de estimativa.

Tabela 19 - Parâmetros estimados e estatísticas de ajuste e precisão obtidas no ajuste do modelo de Clark III et al. (1991) com os efeitos fixos e aleatórios, *Tectona grandis* L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso

Modelo	Coeficientes						SQRes	$S_{yx}\%$	$R^2_{aj.}$
	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5			
Modelo Clark III et al. (1991)	40,8747*	8,5872*	0,8979*	928,2*	0,6551*	1,8062*	6449,61	7,3	0,98
Classe de DAP – $\mu_1+\beta_5$	40,8748*	8,5873*	0,8979*	928,1*	0,6691*	1,8202*	5704,37	6,8	0,99
Classe de DAP – $\mu_1+\beta_2$ e $\mu_2+\beta_5$	41,8823*	8,5969*	0,8922*	929,1*	0,6691*	1,8189*	5537,27	6,7	0,99
Nível de árvore – $\mu_1+\beta_5$	40,8748*	8,5873*	0,8979*	928,1*	0,6925*	1,8757*	4168,33	5,8	0,99
Nível de árvore – $\mu_1+\beta_2$ e $\mu_2+\beta_5$	42,0739*	8,5873*	0,9058*	929,1*	0,6939*	1,8575*	2347,49	4,4	0,99

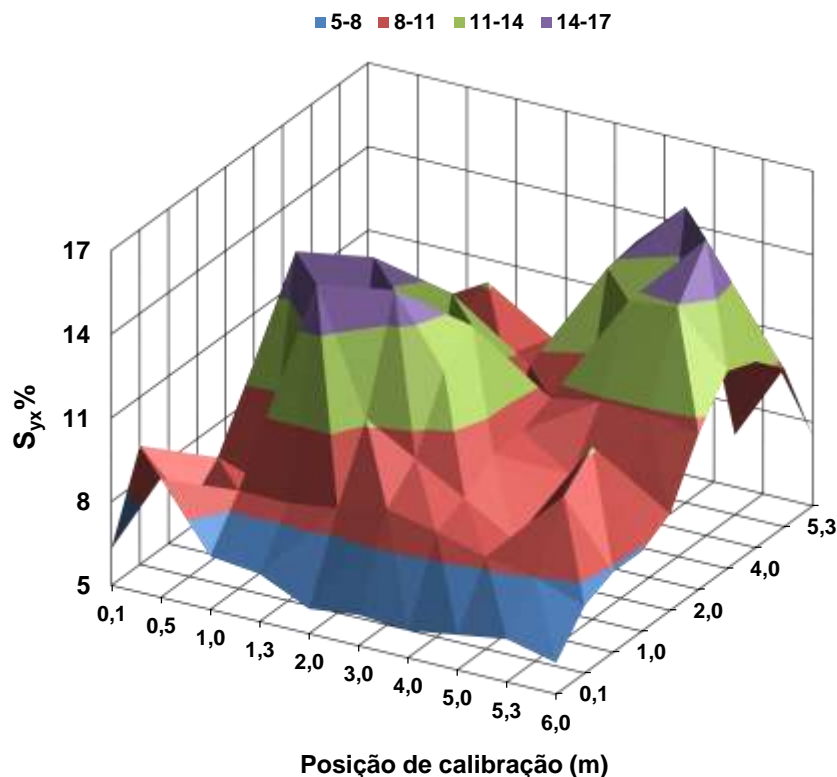
em que: ^{ns} – não significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro; * – significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro; μ_1 e μ_2 – efeitos aleatórios; SQRes - Soma de quadrado dos resíduos; $S_{yx}\%$ - erro padrão da estimativa em porcentagem; $R^2_{aj.}$ - Coeficiente de determinação ajustado.

Fonte: o autor.

Considerando a precisão de 4,4% e a adequada distribuição dos resíduos para as estimativas de d_i ao longo do fuste, adotou-se o modelo de Clark III et al. (1991) com efeitos fixos e efeitos aleatórios em relação à árvore aplicados nos coeficientes β_2 e β_5 para descrever a forma do fuste de *Tectona grandis*. Sendo, portanto, necessário definir as posições de calibração dos parâmetros para a aplicação da equação.

A melhoria no ajuste do modelo com efeito aleatório em dois coeficientes, em relação ao modelo com parâmetros fixos não garantiu redução expressiva dos erros de estimativa (Figura 12 e Apêndice J), sendo as posições na base do fuste, até no máximo 0,5 m, as que mais trouxeram ganho para as estimativas. E a melhor combinação para calibração encontrada nas posições 0,1 m e 2,0 m, a partir da base da árvore, com uma redução de 1,97% no erro médio (em destaque no Apêndice J).

Figura 12 – Comportamento do erro padrão da estimativa em porcentagem ($S_{yx}\%$) no ajuste do modelo de Clark III et al. (1991) com efeito misto para as diferentes posições de calibração dos efeitos aleatórios, *Tectona grandis* L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso, 2018



Fonte: o autor.

4.4.1 Desempenho pelas estatísticas auxiliares e representação gráfica dos ajustes

Todos os ajustes do modelo de Clark III et al. (1991) forneceram estimativas precisas, resultados consistentes e estatisticamente aceitáveis para estimação de diâmetros ao longo do tronco de *Tectona grandis*. A análise do ajuste das equações nas diferentes porções do tronco das árvores da base de dados do ajuste permitiu uma avaliação detalhada do desempenho com base nas estatísticas da Tabela 20.

Tabela 20 – Estatísticas auxiliares dos modelos de Clark III et al. (1991) original, somente com os coeficientes fixos e com os coeficientes fixos e aleatórios para avaliar as estimativas dos diâmetros relativos sem estratificação dos dados para *Tectona grandis* L.f, e o somatório das notas obtidas em cada altura relativa de medição

Equação	Estatística	Alturas relativas de medição				
		0-10%	10%-30%	30%-50%	50%-70%	70%-90%
Modelo original	D	-0,023	0,068	-0,001	-0,119	0,046
	SD	36,859	29,374	24,683	18,734	10,782
	SQRR	0,010	0,002	0,008	0,037	0,132
	RP	-0,297	0,780	0,049	-2,123	-1,242
Modelo coef. Fixos	D	-0,011	0,086	0,154	0,033	-0,038
	SD	36,845	29,351	24,483	18,537	10,891
	SQRR	0,010	0,002	0,008	0,037	0,136
	RP	-0,252	0,841	0,772	-1,083	-2,302
Modelo coef. Fixos + Aleatórios	D	0,011	0,098	0,145	0,012	-0,044
	SD	36,825	29,336	24,485	18,541	10,901
	SQRR	0,003	0,002	0,004	0,010	0,063
	RP	-0,018	0,865	0,725	-0,663	-1,037
SOMA DE NOTAS NAS POSIÇÕES¹						
Modelo original		11	6	7	11	8
Modelo coef. Fixos		7	7	9	7	9
Modelo coef. Fixos + Aleatórios		4	8	7	5	7

em que: D - desvio (cm); SD - desvio padrão das diferenças (cm); SSRR - somatório dos quadrados dos resíduos relativos; e RP - resíduo percentual (%). ¹ quanto menor o valor da nota, melhor o ajuste do modelo para a porção avaliada.

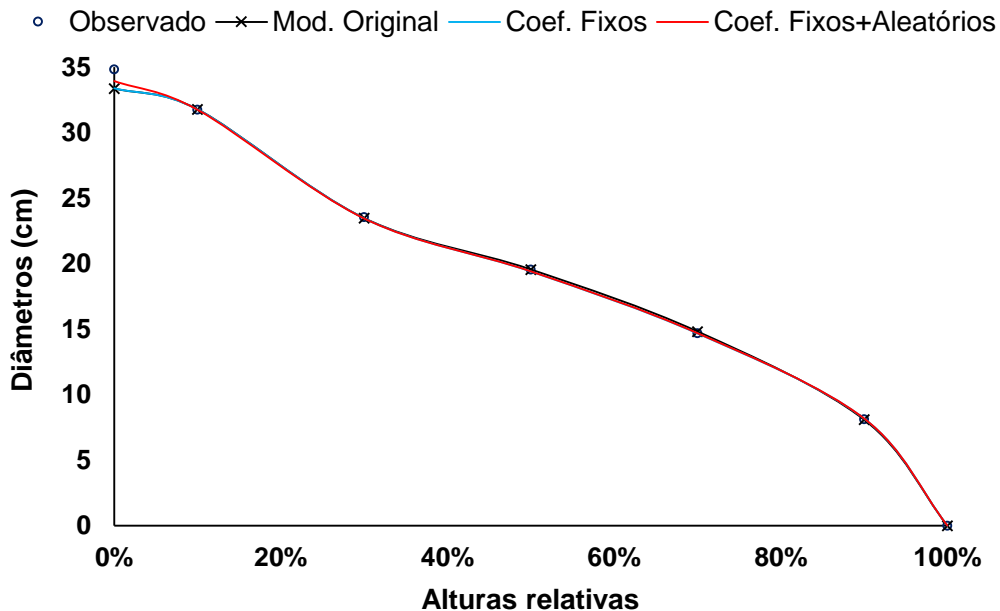
Fonte: o autor.

No geral, todos os ajustes do modelo de Clark III et al. (1991) apresentaram adequado desempenho na porção central do fuste, de 30% a 50% da altura. A equação

com os coeficientes fixos e aleatórios foi ligeiramente melhor nas estimativas da base das árvores (até 10% da altura) e ápice (de 50% até 90% da altura). Estas duas porções são consideradas os principais problemas na representação dos d_i nas funções de afilamento para várias espécies (ASSIS, 2000; GORDON, 1983; SOUZA, 2008a, 2008b, 2009), o qual poderia se acentuar no caso da *Tectona grandis* pela excentricidade que ocorre, principalmente na proximidade da base, pela formação de raízes tabulares, e na base da copa, como já explicitado no estudo de PMF (item 4.1).

Através da análise gráfica do perfil médio gerada com as diferentes equações, verificou-se pequena diferença com os diâmetros observados na porção até 10% da altura (Figura 13), confirmando, o resultado das estatísticas auxiliares, de que o emprego de coeficientes fixos e aleatórios tornou a equação de Clark III et al. (1991) mais flexível.

Figura 13 – Perfis médios reais e estimados pelas equações de Clark III et al. (1991) original, somente com os coeficientes fixos e com os coeficientes fixos e aleatórios sem estratificação dos dados para *Tectona grandis* L.f, região centro-sul do estado de Mato Grosso, 2018

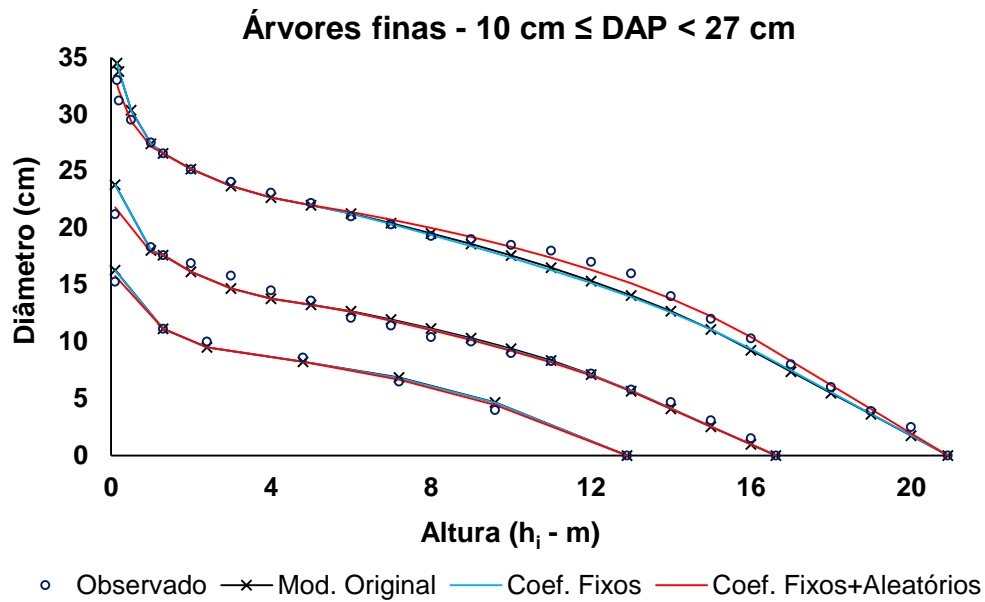


Fonte: o autor.

A análise gráfica dos ajustes da forma de árvores de diferentes magnitudes de diâmetros confirmou o resultado obtido para a árvore média com a equação de coeficientes fixos e aleatórios apresentando estimativas acuradas do diâmetro ao longo

de todo o fuste, independentemente das árvores serem finas, médias ou grossas. E este resultado fica mais evidente conforme aumenta a dimensão das árvores (Figura 14, 15 e 16).

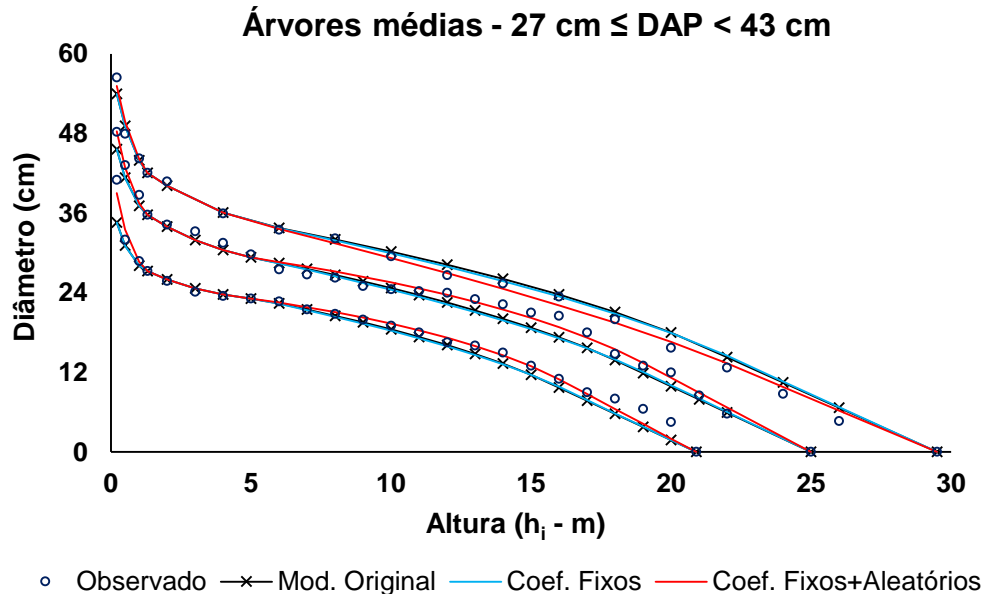
Figura 14 – Representação gráfica dos diâmetros ao longo dos fustes para três árvores finas, com diâmetro a altura do peito (DAP) entre 10 e 26,9 cm, selecionadas aleatoriamente, dos dados de ajuste para o modelo de Clark III et al. (1991) original e para o modelo de Clark et al. (1991) somente com os coeficientes fixos e com os coeficientes fixos e aleatórios para *Tectona grandis* L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso, 2018



Fonte: o autor.

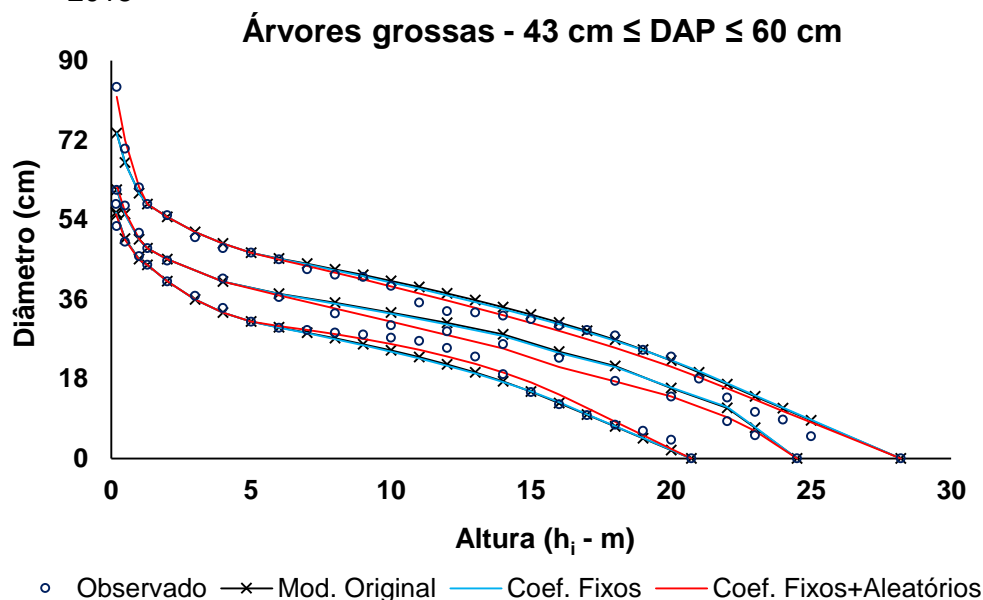
O adequado ajuste do modelo de Clark III et al. (1991) pode ser atribuído ao ajuste segmentado do tronco em quatro segmentos: base (0 até 1,3 m), tronco inferior (1,3 a 5,3 m), tronco médio (5,3 a 40% ou 70% da altura) e tronco superior (40% ou 70% da altura até 100%), além de ser uma equação quadrática para o segmento inferior e linear para o segmento superior (CLARK III et al, 1991).

Figura 15 – Representação gráfica dos diâmetros ao longo dos fustes para três árvores médias, com diâmetro a altura do peito (DAP) entre 27 e 42,9 cm, selecionadas aleatoriamente, dos dados de ajuste para o modelo de Clark III et al. (1991) original e para o modelo de Clark et al. (1991) somente com os coeficientes fixos e com os coeficientes fixos e aleatórios para *Tectona grandis* L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso, 2018



Fonte: o autor.

Figura 16 – Representação gráfica dos diâmetros ao longo dos fustes para três árvores grossas, com diâmetro a altura do peito (DAP) entre 43 e 60 cm, selecionadas aleatoriamente, dos dados de ajuste para o modelo de Clark III et al. (1991) original e para o modelo de Clark et al. (1991) somente com os coeficientes fixos e com os coeficientes fixos e aleatórios para *Tectona grandis* L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso, 2018

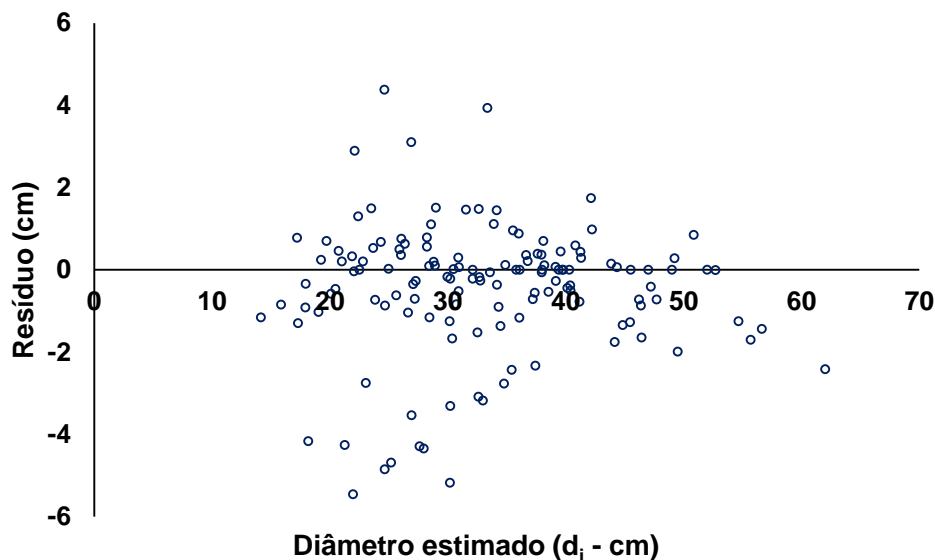


Fonte: o autor.

4.4.2 Aplicação do modelo fixo com os efeitos aleatórios em uma base de dados distinta

Considerando os resultados do item 4.4, as posições de calibração na base do fuste, a primeira até no máximo 0,5 m e a segunda aos 2,0 m, aplicou-se a equação de Clark III et al. (1991) com efeitos aleatórios, utilizando as posições de 0,5 m e 2,0 m para calibração dos efeitos em uma base de dados distinta. O ajuste foi adequado às doze árvores testadas, apresentando estatísticas de ajuste e precisão compatíveis com outros estudos (SQRes de 378,37, $S_{yx}\%$ de 5,21% e $R^2_{aj.}$ de 0,97), mesmo se tratando de árvores submetidas a regime de manejo diferente do utilizado anteriormente, o que justificou maior dispersão dos resíduos nas menores árvores e tendência em superestimar as maiores (Figura 17).

Figura 17 – Distribuição dos resíduos em função dos diâmetros estimados ao longo do fuste para a equação de Clark et al. (1991), com efeito misto, aplicada a uma base distinta da utilizada para o ajuste, *Tectona grandis* L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso, 2018



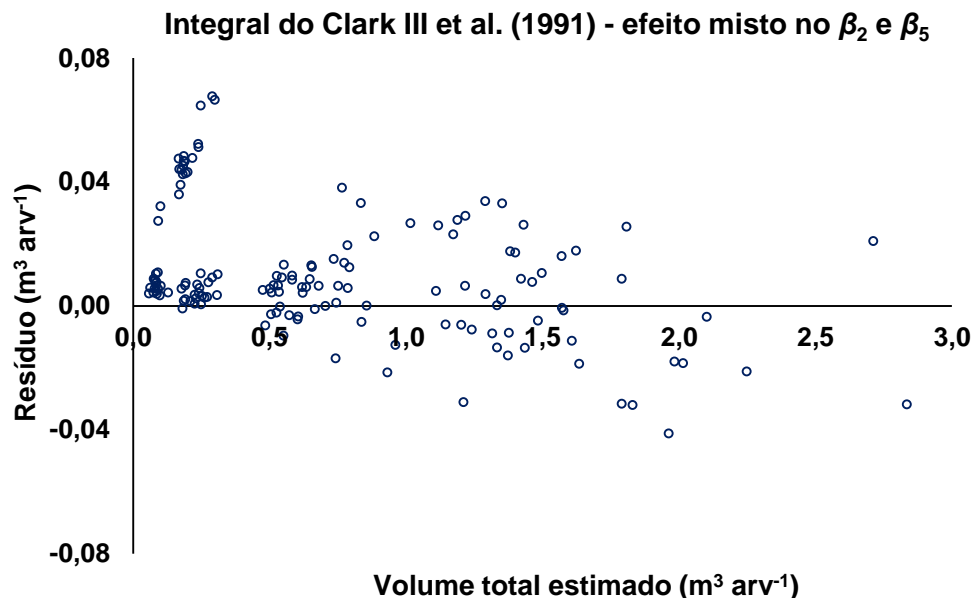
Fonte: o autor.

4.5 VOLUME

O volume calculado pela integração do modelo de Clark III et al. (1991) ajustado com efeito misto apresentou precisão de 3,1%, mas com tendência de subestimar os menores volumes e superestimar os maiores comparado com o volume real (Figura 18).

Estes resultados foram mais acurados que os modelos avaliados por Favalessa et al. (2012b) para a mesma espécie, os quais também apresentaram algumas tendências ao longo da linha média, com precisão de 7,15% para a integral do modelo de Clark III et al. (1991), sem efeito misto. Os autores utilizaram dados com menor amplitude de variação (22,9 a 44 cm), árvores de apenas um local e com o mesmo regime de manejo. Com estes resultados se confirma que a aplicação dos efeitos aleatórios não só explicou a variação dos dados, como também melhorou o ajuste do modelo.

Figura 18 – Resíduo da estimativa do volume total pela integral do modelo de Clark III et al. (1991) em função do volume total estimado para os dados de *Tectona grandis* L.f. sem estratificação, região centro-sul do estado de Mato Grosso, 2018



Fonte: o autor.

4.6 TABELA DE SORTIMENTO

4.6.1 Relação hipsométrica

De maneira geral, os modelos para relação hipsométrica se ajustaram adequadamente aos dados da espécie e seus coeficientes obtiveram resultados significativos pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade de erro (Tabela 21). Os R^2_{aj} variaram de 0,84 a 0,95 e todos os modelos apresentaram $S_{yx}\%$ inferior a 9%, mas, de acordo com estas estatísticas, as melhores equações são as genéricas (1 e 2) que utilizam DAP e h_{100} como variáveis independentes, e a equação de Trorey.

Nenhuma das equações atenderam às condicionantes de homogeneidade de variâncias pelo teste de White e de independência dos resíduos pelo teste de Durbin-Watson, e somente as equações genéricas 1, 2, equações de Stoffels e de Trorey atenderam à normalidade de resíduos pelo teste de Kolgomorov-Smirnov. Porém, a equação de Trorey também apresentou inflação da variância (VIF > 30).

Tabela 21 – Parâmetros estimados e estatísticas de ajuste e precisão de ajustes dos modelos de relação hipsométrica para os dados de *Tectona grandis* L.f. sem estratificação, região centro-sul do estado de Mato Grosso

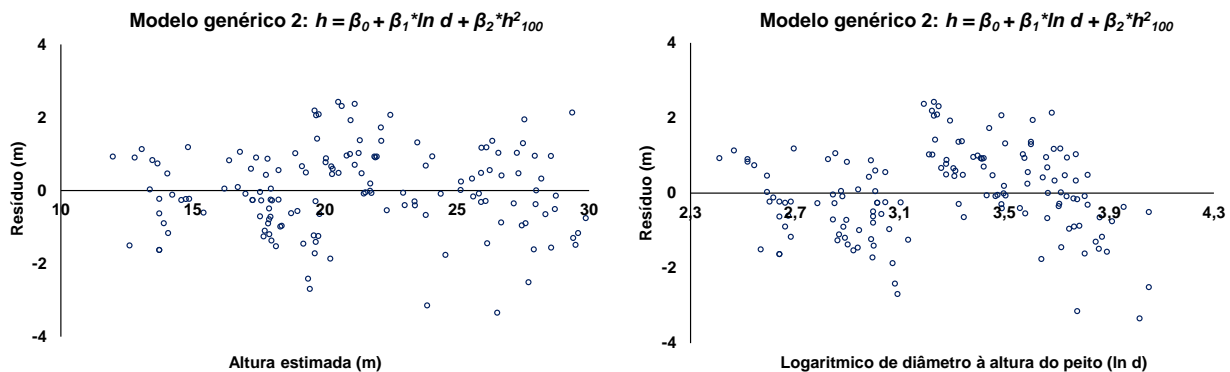
Modelo	COEFICIENTES			SQRes	$S_{yx}\%$	R^2_{aj}
	β_0	β_1	β_2			
Curtis	31,5229*	-252,3624*		528,1	9,01	0,84
Curtis logaritimizado	3,5500*	-12,7807*		440,7	8,24	0,87
Favalessa (a) 2018				440,2	8,23	0,87
Henriksen	-14,1868*	10,7805*		436,2	8,19	0,87
Modelo genérico 1	2,9720*	-9,4863*	0,0208*	165,8	5,07	0,95
Modelo genérico 2	-8,8400*	7,6625*	0,0104*	190,9	5,44	0,94
Stoffels	1,2677*	0,5360*		500,5	8,78	0,85
Trorey	2,6691*	0,9443*	-0,0091*	391,7	7,79	0,88

em que: * – Significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro; SQRes – Soma de quadrado dos resíduos; R^2_{aj} – Coeficiente de determinação ajustado; $S_{yx}\%$ - Erro padrão da estimativa em porcentagem. Fonte: o autor.

Com a análise dos gráficos dos resíduos em função da altura estimada, verifica-se que todas as equações apresentaram tendências nas estimativas das alturas

(Apêndices K). As equações que apresentaram distribuição dos resíduos mais uniforme foram a genérica 2 (Figura 19), a genérica 1 e Trorey (Apêndices K e L respectivamente). Entretanto, foi verificado que com a equação de Trorey não foi possível gerar estimativas acima de 25 m, o que é justificável por ser um modelo parabólico, logo, a curva da estimativa decresce a partir da classe de DAP de 40 cm.

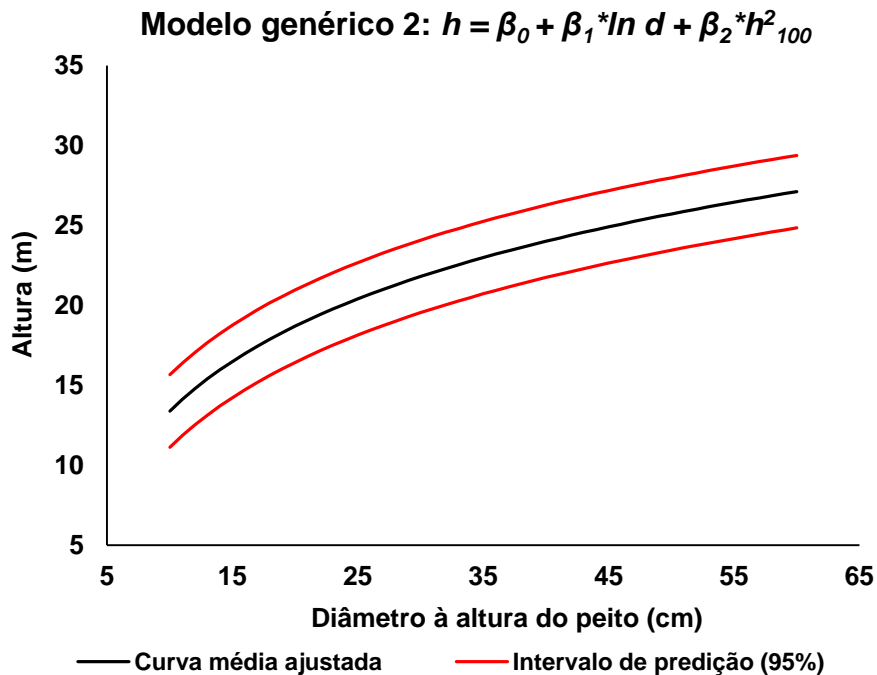
Figura 19 – Resíduo da estimativa da altura pela equação genérica 2: $h = \beta_0 + \beta_1 * \ln d + \beta_2 * h_{100}^2$ em função altura estimada e da primeira variável independente para os dados de *Tectona grandis* L.f. sem estratificação, considerando um sítio intermediário ($h_{100} = 21$ m), Mato Grosso, 2018



Fonte: o autor.

Assim, para a construção das tabelas de sortimento, foram utilizadas as alturas estimadas pela equação genérica 2 (Figura 20), optou-se pela variável dependente h para evitar a discrepância logarítmica. As estimativas da curva de regressão e os limites de predição inferior e superior à 95% de confiança foram utilizadas como alturas para cada centro de classe de DAP.

Figura 20 – Curvas de relação hipsométrica estimadas pela equação genérica 2: $h = \beta_0 + \beta_1 * \ln d + \beta_2 * h_{100}^2$ em função do diâmetro à altura do peito para os dados de *Tectona grandis* L.f. sem estratificação, considerando um sítio intermediário ($h_{100} = 21$ m), Mato Grosso, 2018



Fonte: o autor.

4.6.2 Diâmetros de calibração dos efeitos aleatórios

Preliminarmente à aplicação da equação de afilamento de Clark III et al. (1991) com efeito misto para a construção da tabela de sortimento, foram definidas equações para estimar os diâmetros necessários nas posições de 0,1 m, 2,0 m e 5,3 m de altura.

4.6.2.1 Diâmetro mensurado à 0,1 metro de altura

As equações de diâmetro à 0,1 m de altura ($d_{0,1}$) que apresentaram coeficientes angulares não significativos pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade de erro foram desconsideradas nos demais critérios de seleção, estas também apresentaram $VIF > 10$ (Tabela 22). Os R^2_{aj} variaram de 0,77 a 0,94, e todas as equações apresentaram $S_{yx}\%$ inferior a 15%.

Tabela 22 – Parâmetros estimados e estatísticas de ajuste e precisão dos ajustes dos modelos de diâmetro à 0,1 metro de altura para os dados de *Tectona grandis* L.f. sem estratificação, região centro-sul do estado de Mato Grosso

Modelo	COEFICIENTES				SQRes	S _{yx} %	R ² _{aj.}
	β_0	β_1	β_2	β_3			
Brenac	-0,5945 ^{ns}	1,2182*	4,6309 ^{ns}		327,18	8,87	0,91
Curtis	52,7624*	-480,547*			870,35	14,35	0,77
Curtis logaritimizado	4,2081*	-17,7390*			582,02	11,73	0,84
Disseccu Meyer	13,0702*	1,4880 ^{ns}	0,0289*		427,22	10,13	0,88
Linear simples	0,1687 ^{ns}	1,3454*			327,23	8,80	0,91
Henriksen	-53,7942*	27,3365*			496,66	10,84	0,87
Hohenadl Krenm	1,4058 ^{ns}	1,2275*	0,0026 ^{ns}		326,25	8,85	0,91
Husch	0,3758*	0,9742*			329,90	8,83	0,91
Kopezkey Gerrardt	14,6467*	0,0283*			428,04	10,06	0,89
Modelo genérico 3	2,5946*	-4,6137*	0,0487*		242,07	7,57	0,94
Modelo genérico 4	2,0616*	0,0639*			265,69	7,93	0,93
Modelo genérico 5	-4,7919*	1,0321*	0,6402*		283,98	8,20	0,92
Schumacher	0,7008*	0,7040*	0,5376*		265,05	7,98	0,93
Spurr	17,5597*	0,0011*			430,48	10,09	0,88
Spurr logaritimizado	-0,0285 ^{ns}	0,3748*			278,97	8,12	0,93
Stoate	2,0792 ^{ns}	0,9846*	0,0146 ^{ns}	0,0002 ^{ns}	273,98	8,18	0,92
Stoffels	0,3758*	0,9742*			329,90	8,83	0,91

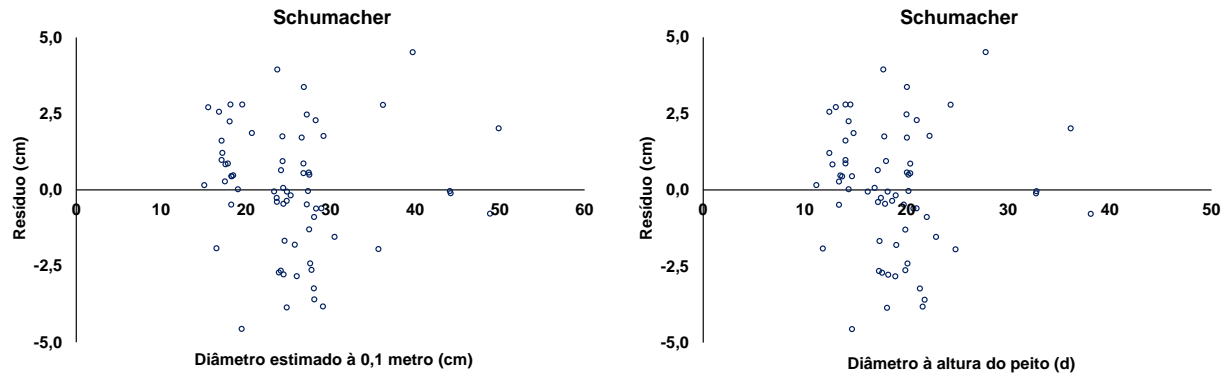
em que: ^{ns} – Não significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro; * – Significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro; SQRes – Soma de quadrado dos resíduos; R²_{aj.} – Coeficiente de determinação ajustado; S_{yx}% - Erro padrão da estimativa em porcentagem.

Fonte: o autor.

Com exceção das equações de Curtis, Curtis logaritimizado, Disseccu Meyer, Henriksen e Spurr, as demais equações apresentaram adequada distribuição dos resíduos pelo $d_{0,1}$ estimado, com leves tendências em superestimar os maiores $d_{0,1}$ (Apêndice M).

Além dos resultados para as estatísticas de ajuste e precisão ($S_{yx}\% = 7,98\%$ e $R^2_{aj.} = 0,93$), somente a equação de Schumacher atendeu à todas as condicionantes de regressão e apresentou variação dos resíduos inferior à 5 cm (Figura 21), sendo assim a equação selecionada.

Figura 21 – Resíduo da estimativa do diâmetro à 0,1 m de altura pela equação de Schumacher em função variável dependente e independente para os dados de *Tectona grandis* L.f. sem estratificação, Mato Grosso, 2018



Fonte: o autor.

4. 6.2.2 Diâmetro mensurado à 2,0 metros de altura

As equações de diâmetro à 2 m de altura ($d_{2,0}$) que apresentaram coeficientes angulares não significativos pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade de erro foram desconsiderados nos demais critérios de seleção (Tabela 23). Os R^2_{aj} variaram de 0,89 a 0,99, e todas as equações apresentaram $S_{yx}\%$ inferior a 12%, mas, de acordo com estas estatísticas, as melhores são a de Brenac, a equação linear simples, a equação genérica 6, a equação de Husch e a de Stoffels. Porém, a equação de Brenac apresentou $VIF > 30$ e a genérica 6 $VIF > 10$.

Com exceção das equações de Curtis, Curtis logaritimizado, Dissecu Meyer, Henriksen, Kopezkey Gerrardt e Spurr, que apresentaram tendências na estimativa, comportamento já relatado no item anterior (4.6.2.1), as demais equações apresentaram adequada distribuição dos resíduos pelo $d_{2,0}$ estimado com variação média de 6 cm do resíduo (Apêndice N). De todas as equações testadas, somente a equação de Husch atendeu à todas as condicionantes de regressão.

Apesar de apresentar os melhores resultados pelos critérios de seleção, a equação de Husch apresentou tendência em superestimar os $d_{2,0}$ para árvores com DAP superior a 45 cm (Figura 22). Ainda assim, a variação do resíduo foi de -4 a 2 cm, sendo a equação utilizada para estimar os $d_{2,0}$ com índice de Meyer (IM) de 1,000452205 para correção da discrepância logarítmica.

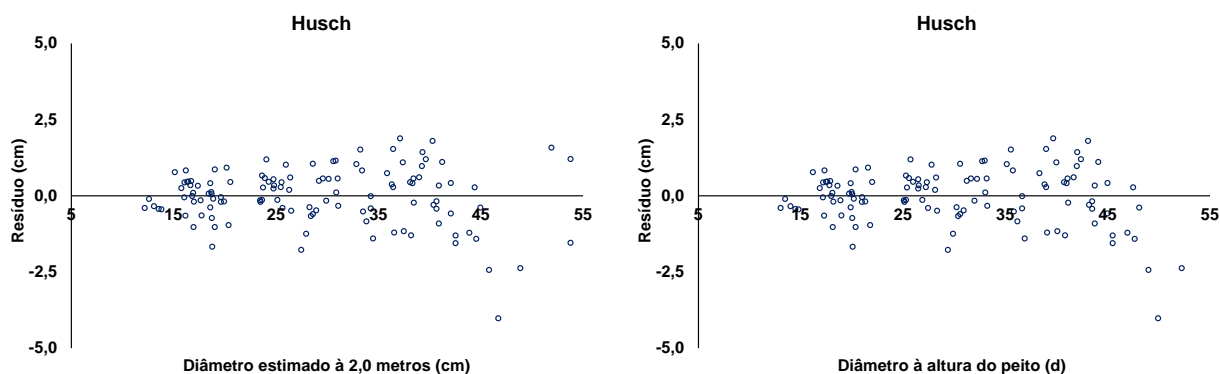
Tabela 23 – Parâmetros estimados e estatísticas de ajuste e precisão dos ajustes dos modelos de diâmetro à 2 metros de altura para os dados de *Tectona grandis* L.f. sem estratificação, região centro-sul do estado de Mato Grosso

Modelo	COEFICIENTES				SQRes	S _{yx} %	R ² _{aj.}
	β_0	β_1	β_2	β_3			
Brenac	0,3152*	0,9124*	-2,3836*		96,70	3,16	0,99
Curtis	54,2763*	-684,233*			1421,96	12,05	0,89
Curtis logaritimizado	4,2614*	-26,0146*			511,00	7,22	0,96
Dissescu Meyer	28,5886*	-15,1310*	0,0110*		402,52	6,44	0,97
Equação da reta	0,2090 ^{ns}	0,9277*			100,71	3,21	0,99
Henriksen	-62,5029*	27,1655*			403,25	6,42	0,97
Hohenadl Krenm	-1,2145 ^{ns}	1,0262*	-0,0015 ^{ns}		96,63	3,16	0,99
Husch	-0,0732*	1,0015*			101,89	3,23	0,99
Kopezkey Gerrardt	14,0862*	0,0137*			527,06	7,34	0,96
Modelo genérico 6	0,3061*	0,9202*	-2,5362*		97,54	3,17	0,99
Schumacher	0,9349*	0,9785*	0,0239 ^{ns}		99,52	3,20	0,99
Spurr	16,3665*	0,0005*			766,52	8,85	0,94
Spurr ln	-0,5964*	0,3971*			223,51	4,78	0,98
Stoate	-3,6990*	0,9274*	0,0242*	-0,0005*	135,73	3,76	0,99
Stoffels	-0,0732*	1,0015*			101,89	3,23	0,99

em que: ^{ns} – Não significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro; * – Significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro; SQRes – Soma de quadrado dos resíduos; R²_{aj.} – Coeficiente de determinação ajustado; S_{yx}% - Erro padrão da estimativa em porcentagem.

Fonte: o autor.

Figura 22 – Resíduo da estimativa do diâmetro à 2 m de altura pelo modelo de Husch em função variável dependente e independente para os dados de *Tectona grandis* L.f. sem estratificação, região centro-sul do estado de Mato Grosso, 2018



Fonte: o autor.

4. 6.2.3 Diâmetro mensurado à 5,3 metros de altura

De maneira geral, os modelos para estimar o diâmetro à 5,3 metros de altura ($d_{5,3}$) ajustaram-se adequadamente aos dados da espécie e os seus coeficientes foram significativos pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade de erro (Tabela 24). Os $R^2_{aj.}$ variaram de 0,88 a 0,96 e todas as equações apresentaram $S_{yx}\%$ inferior a 8%, sendo as melhores equações as genéricas (7 e 8), que utilizam a relação entre o $d_{2,0}$ e o DAP na tentativa de descrever a forma do fuste (k); e as equações de Stoate, de Schumacher e Hall, de Spurr logaritimizado; e a equação proposta por Clark III et al. (1991) ao desenvolverem sua função de afilamento. Porém, a equação genérica 8 apresentou VIF > 970 e a de Stoate VIF > 80.

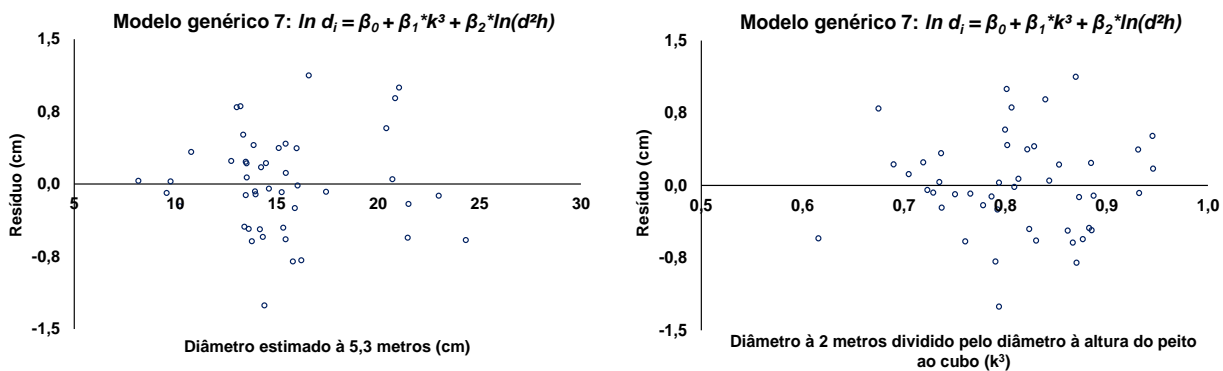
Tabela 24 – Parâmetros estimados e estatísticas de ajuste e precisão dos ajustes dos modelos de diâmetro à 5,3 metros de altura para os dados de *Tectona grandis* L.f. sem estratificação, região centro-sul do estado de Mato Grosso

Modelo	COEFICIENTES				SQRes	$S_{yx}\%$	$R^2_{aj.}$
	β_0	β_1	β_2	β_3			
Brenac	0,5706*	0,8327*	-6,6352*		30,06	5,35	0,95
Clark III et al. (1991)	0,8841*	-1,3073*			22,96	4,68	0,96
Curtis (1967)	33,0289*	-340,905*			65,40	7,89	0,88
Curtis ln (1967)	3,8783*	-22,6208*			37,69	5,99	0,93
Dissescu e Meyer	0,3411*	5,9510*	0,0232*		31,92	5,51	0,94
Equação da reta	-2,4937*	0,8931*			29,88	5,33	0,95
Henricksen (1950)	-38,4040*	18,0582*			38,95	6,09	0,93
Hohenadl e Krenm	-2,3748*	0,8815*	0,0003*		29,87	5,33	0,95
Husch	-0,7847*	1,1724*			30,19	5,36	0,95
Kopezky Gerhardt	6,7696*	0,0207*			37,49	5,98	0,93
Modelo genérico 7	-1,5853*	0,4128*	0,4482*		11,43	3,30	0,98
Modelo genérico 8	-3,3640*	6,2364*	0,1606*		12,07	3,39	0,98
Schumacher e Hall	0,2648*	0,8688*	0,5044*		21,04	4,48	0,96
Spurr	8,8534*	0,0008*			40,61	6,15	0,95
Spurr ln	-1,3108*	0,4550*			21,20	4,49	0,96
Stoate	-2,9574*	0,6509*	0,0258*	-0,0005*	20,24	4,39	0,96
Stoffels e Van Soest (1953)	-0,7847*	1,1724*			30,19	5,36	0,95

em que: * – Significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro; SQRes – Soma de quadrado dos resíduos; $R^2_{aj.}$ – Coeficiente de determinação ajustado; $S_{yx}\%$ - Erro padrão da estimativa em porcentagem. Fonte: o autor.

As equações de Clark III et al. (1991), da reta, Husch, genérica 7, Schumacher e Hall, Spurr logaritimizado e Stoffels atenderam a todas as condicionantes de regressão. Destas, apenas a genérica 7 apresentou distribuição homogênea dos resíduos em função do $d_{5,3}$ estimado; as demais apresentaram tendências, principalmente nos menores e maiores diâmetros estimados (Apêndice O). Além da adequada dispersão, os resíduos da equação genérica 7 variaram de -1,3 a 1,2 cm (Figura 23), sendo assim selecionada para as estimativas do $d_{5,3}$ com IM de 1,0005536 para correção da discrepância logarítmica.

Figura 23 – Resíduo da estimativa do diâmetro à 5,3 m de altura pelo modelo genérico 7: $\ln(d_{5,3}) = \beta_0 + \beta_1 * k^3 + \beta_2 * \ln(d^2h)$ em função variável dependente e independente para os dados de *Tectona grandis* L.f. sem estratificação, região centro-sul do estado de Mato Grosso, 2018



Fonte: o autor.

4.6.3 Sortimentos para *Tectona grandis* L.f. na região centro-sul do estado de Mato Grosso

Na tabela de sortimento se verificou o deslocamento no número e volume de toras para os sortimentos S1 ($d_{fina} \geq 49$ cm; $\ell = 4,6$ m) e S2 ($d_{fina} \geq 39$ cm; $\ell = 3,7$ m) com o aumento das dimensões das árvores (Tabela 25). Os resíduos resultantes na classificação das árvores segundo os sortimentos, com priorização da formação dos sortimentos de maior dimensão, variaram de 46% (por exemplo, $d = 10$ cm; $h = 11,1$ m) até menor do que 1% ($d = 60$ cm; $h = 29,4$ m). Com exceção das menores classes de

DAP, centro de classe inferior a 22 cm, o volume destinado ao sortimento S5 ($d_{\text{fina}} \geq 7$ cm; $\ell = 1,0$ m) e resíduo decrescem, visto que os mesmos não atendem aos critérios de classificação dos sortimentos melhor remunerados.

Tabela 25 – Sortimentos para *Tectona grandis* L.f. pelo modelo de Clark III et al. (1991) com efeito misto, índice de sítio 21, para a região centro-sul do estado de Mato Grosso

d	h	h/d	V _{toco}	S1		S2		S3		S4		S5		V _{total}	Resíduo
				n	m ³	n	m ³	n	m ³	n	m ³	n	m ³		
10	11,1	1,11	0,0008	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	3	0,0195	0,0375	0,0171
	13,4	1,34	0,0015	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	5	0,0310	0,0473	0,0149
	15,7	1,57	0,0020	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	6	0,0393	0,0583	0,0169
12	12,5	1,04	0,0015	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	6	0,0464	0,0603	0,0123
	14,8	1,23	0,0023	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	8	0,0621	0,0748	0,0104
	17,1	1,42	0,0030	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	9	0,0745	0,0909	0,0133
14	13,7	0,98	0,0023	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	8	0,0770	0,0891	0,0098
	16,0	1,14	0,0033	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	10	0,0974	0,1094	0,0087
	18,2	1,30	0,0041	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	11	0,1152	0,1315	0,0122
16	14,7	0,92	0,0032	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	10	0,1146	0,1244	0,0066
	17,0	1,06	0,0043	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	11	0,1367	0,1511	0,0101
	19,3	1,20	0,0053	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	13	0,1654	0,1803	0,0096
18	15,6	0,87	0,0042	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	11	0,1552	0,1662	0,0068
	17,9	0,99	0,0055	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	13	0,1885	0,2004	0,0064
	20,2	1,12	0,0066	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	14	0,2204	0,2375	0,0106
20	16,4	0,82	0,0052	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	12	0,2028	0,2146	0,0066
	18,7	0,94	0,0067	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	14	0,2442	0,2573	0,0064
	21,0	1,05	0,0079	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	16	0,2891	0,3034	0,0063
22	17,2	0,78	0,0063	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	1	0,0926	10	0,1621	0,2700	0,0090
	19,4	0,88	0,0079	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	1	0,0999	12	0,2054	0,3220	0,0088
	21,7	0,99	0,0094	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	1	0,1069	14	0,2531	0,3780	0,0086
24	17,8	0,74	0,0074	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	1	0,1106	11	0,2065	0,3325	0,0080
	20,1	0,84	0,0093	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	2	0,1964	13	0,1831	0,3947	0,0060
	22,4	0,93	0,0110	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	2	0,2103	13	0,2343	0,4617	0,0061
26	18,4	0,71	0,0086	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	2	0,2147	10	0,1741	0,4021	0,0048
	20,7	0,80	0,0107	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	3	0,3070	9	0,1495	0,4757	0,0084
	23,0	0,88	0,0126	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	3	0,3310	11	0,2019	0,5545	0,0090
28	19,0	0,68	0,0099	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	3	0,3295	8	0,1333	0,4792	0,0065
	21,3	0,76	0,0122	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	3	0,3579	10	0,1876	0,5650	0,0073
	23,5	0,84	0,0143	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	4	0,4673	9	0,1655	0,6567	0,0095
30	19,5	0,65	0,0112	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	3	0,3809	9	0,1666	0,5639	0,0052
	21,8	0,73	0,0138	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	4	0,4968	8	0,1449	0,6628	0,0074
	24,1	0,80	0,0161	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	5	0,6168	8	0,1297	0,7684	0,0058

(Continua)

Tabela 25 – Sortimentos para *Tectona grandis* L.f. pelo modelo de Clark III et al. (1991) com efeito misto, índice de sítio 21, para a região centro-sul do estado de Mato Grosso

(Continuação)

d	h	h/d	V _{toco}	S1		S2		S3		S4		S5		V _{total}	Resíduo
				n	m ³	n	m ³	n	m ³	n	m ³	n	m ³		
32	20,0	0,63	0,0126	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	4	0,5195	7	0,1190	0,6562	0,0050
	22,3	0,70	0,0155	0	0,0000	0	0,0000	1	0,2104	3	0,3581	9	0,1800	0,7694	0,0054
	24,6	0,77	0,0180	0	0,0000	0	0,0000	1	0,2229	4	0,4831	8	0,1569	0,8899	0,0090
34	20,5	0,60	0,0141	0	0,0000	0	0,0000	1	0,2228	3	0,3682	7	0,1434	0,7565	0,0080
	22,8	0,67	0,0172	0	0,0000	0	0,0000	1	0,2371	4	0,4970	7	0,1275	0,8850	0,0062
	25,0	0,74	0,0199	0	0,0000	0	0,0000	1	0,2507	5	0,6329	7	0,1130	1,0213	0,0048
36	20,9	0,58	0,0156	0	0,0000	0	0,0000	1	0,2496	4	0,5012	5	0,0896	0,8649	0,0089
	23,2	0,64	0,0189	0	0,0000	0	0,0000	2	0,4469	3	0,3818	8	0,1579	1,0096	0,0041
	25,5	0,71	0,0219	0	0,0000	0	0,0000	2	0,4732	4	0,5243	7	0,1360	1,1630	0,0075
38	21,4	0,56	0,0171	0	0,0000	0	0,0000	2	0,4680	3	0,3760	6	0,1146	0,9815	0,0058
	23,6	0,62	0,0207	0	0,0000	0	0,0000	2	0,4982	4	0,5197	6	0,1005	1,1436	0,0045
	25,9	0,68	0,0240	0	0,0000	0	0,0000	3	0,7137	3	0,4050	8	0,1674	1,3150	0,0050
40	21,7	0,54	0,0187	0	0,0000	0	0,0000	2	0,5193	3	0,4234	6	0,1364	1,1066	0,0088
	24,0	0,60	0,0226	0	0,0000	0	0,0000	3	0,7426	3	0,3944	6	0,1205	1,2870	0,0069
	26,3	0,66	0,0261	0	0,0000	0	0,0000	4	0,9715	3	0,3691	6	0,1055	1,4776	0,0054
42	22,1	0,53	0,0203	0	0,0000	0	0,0000	3	0,7651	3	0,3718	5	0,0796	1,2402	0,0035
	24,4	0,58	0,0245	0	0,0000	0	0,0000	4	0,9998	2	0,2632	7	0,1485	1,4403	0,0041
	26,7	0,63	0,0283	0	0,0000	0	0,0000	4	1,0731	3	0,4160	6	0,1257	1,6510	0,0079
44	22,5	0,51	0,0220	0	0,0000	0	0,0000	3	0,8418	3	0,4177	5	0,0957	1,3827	0,0055
	24,7	0,56	0,0265	0	0,0000	0	0,0000	4	1,1006	3	0,3896	5	0,0825	1,6034	0,0042
	27,0	0,61	0,0306	0	0,0000	1	0,5767	3	0,7097	3	0,4103	5	0,0994	1,8356	0,0089
46	22,8	0,50	0,0237	0	0,0000	0	0,0000	4	1,1168	2	0,2719	5	0,1136	1,5341	0,0081
	25,1	0,55	0,0286	0	0,0000	1	0,5992	3	0,7110	2	0,2885	6	0,1424	1,7766	0,0069
	27,4	0,59	0,0329	0	0,0000	1	0,6291	4	0,9704	2	0,2692	6	0,1243	2,0314	0,0054
48	23,1	0,48	0,0255	0	0,0000	1	0,6180	3	0,7016	2	0,2576	5	0,0889	1,6947	0,0030
	25,4	0,53	0,0307	0	0,0000	1	0,6517	4	0,9614	2	0,2385	4	0,0711	1,9602	0,0069
	27,7	0,58	0,0353	0	0,0000	1	0,6837	4	1,0646	2	0,3014	6	0,1459	2,2387	0,0078
50	23,5	0,47	0,0273	0	0,0000	1	0,6704	3	0,7681	2	0,2884	5	0,1057	1,8646	0,0047
	25,7	0,51	0,0328	0	0,0000	1	0,7064	4	1,0527	2	0,2682	5	0,0907	2,1544	0,0036
	28,0	0,56	0,0377	0	0,0000	2	1,2626	3	0,7494	2	0,2880	6	0,1171	2,4579	0,0030
52	23,8	0,46	0,0292	0	0,0000	1	0,7249	4	1,0228	1	0,1360	5	0,1243	2,0441	0,0069
	26,0	0,50	0,0350	0	0,0000	2	1,2882	3	0,7238	2	0,2464	4	0,0621	2,3593	0,0038
	28,3	0,54	0,0402	0	0,0000	2	1,3656	4	1,0045	2	0,2236	4	0,0522	2,6890	0,0029
54	24,0	0,45	0,0311	0	0,0000	2	1,3044	2	0,5044	2	0,2988	4	0,0873	2,2333	0,0073
	26,3	0,49	0,0372	0	0,0000	2	1,3901	3	0,7915	2	0,2765	4	0,0742	2,5752	0,0056
	28,6	0,53	0,0428	0	0,0000	3	1,9828	2	0,5005	2	0,3005	5	0,1010	2,9324	0,0048

(Continua)

Tabela 25 – Sortimentos para *Tectona grandis* L.f. pelo modelo de Clark III et al. (1991) com efeito misto, índice de sítio 21, para a região centro-sul do estado de Mato Grosso

(Continuação)

d	h	h/d	V _{toco}	S1		S2		S3		S4		S5		V _{total}	Resíduo
				n	m ³	n	m ³	n	m ³	n	m ³	n	m ³		
	24,3	0,43	0,0330	0	0,0000	2	1,4048	3	0,7443	1	0,1377	5	0,1093	2,4324	0,0033
56	26,6	0,47	0,0395	0	0,0000	2	1,4958	3	0,8627	2	0,3086	4	0,0877	2,8022	0,0079
	28,9	0,52	0,0454	0	0,0000	3	2,1364	3	0,7423	1	0,1391	5	0,1183	3,1883	0,0068
	24,6	0,42	0,0350	0	0,0000	2	1,5088	3	0,8114	1	0,1536	5	0,1278	2,6415	0,0049
58	26,9	0,46	0,0418	0	0,0000	3	2,1462	2	0,5131	2	0,2763	3	0,0552	3,0407	0,0082
	29,1	0,50	0,0480	1	1,1734	2	1,2502	3	0,7489	1	0,1323	5	0,1005	3,4569	0,0036
	24,9	0,41	0,0370	0	0,0000	3	2,1359	2	0,4630	1	0,1345	4	0,0856	2,8610	0,0050
60	27,1	0,45	0,0442	1	1,1969	2	1,2284	2	0,5147	1	0,1629	5	0,1370	3,2908	0,0068
	29,4	0,49	0,0507	1	1,2540	2	1,3454	3	0,8179	1	0,1481	5	0,1173	3,7385	0,0052

em que: d – classe de diâmetro à altura do peito (cm); h – altura (m); h/d – relação entre a altura e o diâmetro à altura do peito (DAP); V_{toco} – volume do toco, considerando a altura de corte de 10 cm (m³); n – número de toras por sortimento; m³ - volume em metros cúbicos por sortimento; S1 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 49 cm, e 4,6 m de comprimento; S2 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 39 cm, e 3,7 m de comprimento; S3 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 29 cm, e 2,4 m de comprimento; S4 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 19 cm, e 2,4 m de comprimento; S5 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 7 cm, e 1,0 m de comprimento; Resíduo – em m³.
Fonte: o autor.

Ao analisar o resultado da tabela de sortimentos por classe de DAP é possível verificar oscilações na combinação dos sortimentos, valores retratados pela relação h/d, onde árvores mais grossas as vezes possuem alturas menores que árvores mais finas (em destaque na Tabela 25). O crescimento em diâmetro de árvores individuais é afetado normalmente pelo regime de manejo e, desta forma, a relação h/d reflete como ocorre a distribuição dos incrementos de *d*; ao longo do fuste. Ao incluir a relação h/d na tabela de sortimento, amplia-se a aplicação da mesma para diferentes povoamentos.

considerada, o sistema irá adotar como padrão a simulação árvores por área da unidade amostral e altura do toco de 10 cm. As definições apresentadas podem ser alteradas diretamente no teclado.

Quando a simulação é realizada por talhão ou por população, as respectivas áreas devem ser informadas no campo “área ua” na página inicial de cadastro dos dados do simulador.

Figura 25 – Página de seleção dos critérios do simulador com dados de entrada provenientes de inventário florestal para otimização de sortimentos de *Tectona grandis* L.f.

Sortimento			
	Diâmetro mínimo	Comprimento	Receita*
S1	49	4.60	540.00
S2	39	3.70	491.00
S3	29	2.40	442.00
S4	19	2.40	393.00
S5	7	1.00	344.00
Resíduo	-	-	21.00

*US\$/m³

Fonte: o autor.

Depois de ler os dados de entrada, o sistema utiliza os módulos complementares do sistema para completar as informações faltantes, necessárias para carregar a função de afilamento de Clark III et al. (1991), com efeito misto e recalculando os efeitos aleatórios dos parâmetros β_2 e β_5 para a estimativa do perfil das árvores e, conseqüentemente, calcular os volumes. Caso não seja possível mensurar as alturas durante o inventário florestal, a mesma será estimada com a equação 03, sendo necessário apenas o DAP da respectiva árvore e altura dominante do sítio, variáveis de entrada informadas.

$$h_j = -8,84 + 7,6625 * \ln d_j + 0,0104 * h_{100j}^2 \quad [\text{Eq. 03}]$$

em que: h_j – altura da árvore j , em m; d_j – diâmetro a altura do peito da árvore j , em cm; \ln – logaritmo neperiano; e h_{100j} – altura dominante da árvore j , em m.

Fonte: o autor.

Além dos $d_{0,1}$ e $d_{2,0}$ serem utilizados como pontos de calibração dos efeitos aleatórios, o $d_{2,0}$ também é necessário para estimar o $d_{5,3}$, variável independente da equação de afilamento de Clark III et al. (1991). Estes quando não mensurados no inventário serão estimados com as equações 04 e 05, respectivamente. O $d_{5,3}$ será estimado pela equação 06, necessário tanto para estimativa do perfil, como para o cálculo do volume.

$$d_{0,1j} = 0,7008 * d_j^{0,704} * h_j^{0,5376} \quad [\text{Eq. 04}]$$

$$\ln d_{2,0j} = \exp(-0,0732 + 1,0015 * \ln d_j) * 1,000452205 \quad [\text{Eq. 05}]$$

$$\ln d_{5,3j} = \exp \left[-1,5853 + 0,4128 * \left(\frac{d_{2,0j}}{d_j} \right)^3 + 0,4482 * \ln (d_j^2 h_j) \right] * 1,0005536 \quad [\text{Eq. 06}]$$

em que: d_j – diâmetro a altura do peito da árvore j , em cm; $d_{0,1j}$ – diâmetro à 0,1 m de altura da árvore j , em cm; $d_{2,0j}$ – diâmetro à 2,0 m de altura da árvore j , em cm; $d_{5,3j}$ – diâmetro à 5,3 m de altura da árvore j , em cm; \ln – logaritmo neperiano; h_j – altura da árvore j , em m; e \exp – exponencial.

Fonte: o autor.

Essas informações devem ser processadas logo no início, antes de proceder o traçamento das toras, uma vez que deve ser estimada, para cada árvore, o comprimento útil do fuste, altura do toco até o ápice ($d_{fina} = 0$ cm); e calculado os efeitos aleatórios μ_1 e μ_2 . Na sequência, o perfil do fuste de cada árvore, é estimado pela equação 07, e os volumes totais e parciais obtidos através da integral da mesma equação. O volume total é necessário para as restrições dos volumes parciais dos sortimentos.

d_{ij}

$$= \left\{ \begin{array}{l} IS * d_j^2 \left\{ 1 + \left[(0,9058 + \mu_1) + \frac{929,1}{d_j^3} \right] * \left[\frac{\left(1 - \frac{h_{ij}}{h_j}\right)^{42,0739} - \left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{42,0739}}{1 - \left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{42,0739}} \right] \right\} + \\ IB * \left\{ d_j^2 - (d_j^2 - d_{5,3j}^2) * \left[\frac{\left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{8,5873} - \left(1 - \frac{h_{ij}}{h_j}\right)^{8,5873}}{\left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{8,5873} - \left(1 - \frac{5,3}{h_j}\right)^{8,5873}} \right] \right\} + \\ IT * \left\{ \begin{array}{l} d_{5,3j}^2 * \left[(1,8575 + \mu_2) * \left(\frac{h_{ij} - 5,3}{h_j - 5,3} - 1 \right)^2 \right] + \\ IM * \left[\frac{1 - (1,8575 + \mu_2)}{0,6939^2} * \left(0,6939 - \frac{h_{ij} - 5,3}{h_j - 5,3} \right)^2 \right] \end{array} \right\} \end{array} \right\}^{0,5} \quad [\text{Eq. 07}]$$

em que: d_j – diâmetro a altura do peito da árvore j , em cm; d_{ij} – diâmetro na posição i da árvore j , em cm;

$d_{5,3j}$ – diâmetro à 5,3 m de altura da árvore j , em cm; β_k – coeficiente de regressão; h_j – altura da árvore j , em m; h_{ij} – altura na posição i da árvore j , em m; μ_k – efeito aleatório; IS , IB , IT e IM – pontos de ligação da equação de afilamento de Clark III et al. (1991).

Fonte: o autor.

Na sequência, o Módulo de Traçamento de Toras (MTT) verifica, para cada árvore, a possibilidade de cada sortimento ocorrer utilizando o perfil estimado pela equação 05 e os critérios de classificação dos sortimentos inicialmente carregados no sistema. O sistema não considera no MTT a geração de padrões com desperdício, como, por exemplo, a obtenção apenas de toras para o sortimento S2 ($d_{fina} \geq 39$ cm) a partir de árvores de grandes dimensões enquanto que da mesma árvore podem ser obtidas toras de outros produtos.

O MTT controla as dimensões ao longo dos fustes de modo a evitar que toras que poderiam ser utilizadas para fins mais nobres acabem sendo utilizadas como lenha e/ou resíduo comercial. Porém, na prática, nem sempre é isto o que acontece, uma vez que o custo de interromper as atividades de uma grande fábrica pode ser várias vezes superior ao desperdício que significa mandar toras de serraria ou laminação para caldeiras.

4.7.1.2 Simulação considerando distribuição diamétrica

Quando os dados de entrada são provenientes de simulação de uma função de distribuição diamétrica, o sistema organiza as informações das classes em ordem crescente, carrega os dados e verifica se a base para o ajuste está completa. A única informação da classe de DAP, que é obrigatória para iniciar o sistema, é o centro da classe de DAP.

Após o cadastro dos dados da simulação, outras informações também são necessárias para iniciar o sistema como o sítio para o qual foi gerado a distribuição diamétrica, o objetivo da maximização e os critérios de classificação dos sortimentos (Figura 26). Como padrão, o sistema adotará que o relatório gerado ao final da otimização será por classe de DAP por unidade amostral e altura do toco de 10 cm.

Quando simulação é realizada por talhão ou por população, as respectivas áreas devem ser informadas no campo “área ua” na página inicial de cadastro dos dados do simulador (Figura 24).

Figura 26 – Página de seleção dos critérios do simulador com dados de entrada da distribuição de diâmetros para otimização de sortimentos de *Tectona grandis* L.f.

Sítio	21
Maximização	Renda
Dados de entrada	Simulação
Gerar relatório	<input type="checkbox"/> Por árvore <input checked="" type="checkbox"/> Por classe de diâmetro <input type="checkbox"/> Por sortimento
Unidade	<input checked="" type="checkbox"/> Por unidade amostral <input type="checkbox"/> Por talhão <input type="checkbox"/> Por população

Sortimento			
	Diâmetro mínimo	Comprimento	Receita*
S1	49	4.60	540.00
S2	39	3.70	491.00
S3	29	2.40	442.00
S4	19	2.40	393.00
S5	7	1.00	344.00
Resíduo	-	-	21.00

*US\$/m³

Altura do toco (m)	<input type="radio"/> Sem toco <input checked="" type="radio"/> Toco de 0,10 m <input type="radio"/> Toco de 0,20 m
---------------------------	---

Fonte: o autor.

Depois de ler os dados de entrada, o sistema utiliza os módulos complementares para suprir as informações necessárias para carregar a função de afilamento de Clark III et al. (1991), com efeito misto, e recalcula os efeitos aleatórios dos parâmetros β_2 e β_5 , para realizar a estimativa dos perfis das árvores e, conseqüentemente, o cálculo do volume. Caso não seja possível determinar as alturas médias por classe de DAP, a mesma será estimada com a equação 03 utilizando apenas o centro da classe e altura dominante do sítio.

As equações 04 e 05 podem ser utilizadas para estimar os diâmetros médios de cada classe nos pontos de calibração dos efeitos aleatórios, $d_{0,1}$ e $d_{2,0}$ respectivamente. O $d_{2,0}$ médio estimado ainda pode ser utilizado para estimar o $d_{5,3}$ da respectiva classe de DAP, necessário para a aplicação da equação de Clark III et al. (1991). O $d_{5,3}$ da classe é estimado pela equação 06, tanto para estimativa do perfil médio como para o cálculo do volume médio da classe.

Antes de proceder ao traçamento das toras, será definido o comprimento útil do fuste de cada árvore representativa das classes de DAP, e calculado os efeitos aleatórios μ_1 e μ_2 para as mesmas. O perfil do fuste representativo de cada classe de DAP é estimado pela equação 07, e os volumes totais e parciais obtidos pela integral da mesma equação. O MTT verifica, para cada classe, a possibilidade de cada sortimento ocorrer

utilizando o perfil médio estimado pela equação 07 e os critérios de classificação dos sortimentos inicialmente carregados no sistema.

4.7.3 Otimização dos sortimentos florestais

O Módulo de Otimização do Sortimento (MOS) responde ao cenário que está sendo considerado, no caso a maximização da renda ou a maximização do volume (minimização do resíduo). Após encontrar a solução ótima, o sistema gera e exporta em planilhas do Excel® os relatórios com as informações previamente solicitadas (Figura 27).

Figura 27 – Relatório da otimização dos sortimentos de *Tectona grandis* L.f. gerado por árvore para maximização da renda

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
1	d	h	hd	vtoco	n1	v1	R1	n2	v2	R2	n3	v3	R3	n4	v4	R4	n5	v5	R5	Resíduo	Rres	vtotal	RECEITA
2	10	11.1	1.11	0.0008	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	3	0.0195	6.72	0.0171	0.36	0.0375	7.08
3	10	13.4	1.34	0.0015	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	5	0.0310	10.66	0.0149	0.31	0.0473	10.97
4	10	15.7	1.57	0.0020	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	6	0.0393	13.53	0.0169	0.35	0.0583	13.89
5	12	12.5	1.04	0.0015	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	6	0.0464	15.95	0.0123	0.26	0.0603	16.21
6	12	14.8	1.23	0.0023	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	8	0.0621	21.35	0.0104	0.22	0.0748	21.57
7	12	17.1	1.42	0.0030	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	9	0.0745	25.64	0.0133	0.28	0.0909	25.92
8	14	13.7	0.98	0.0023	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	8	0.0770	26.49	0.0098	0.21	0.0891	26.70
9	14	16.0	1.14	0.0033	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	10	0.0974	33.50	0.0087	0.18	0.1094	33.68
10	14	18.2	1.30	0.0041	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	11	0.1152	39.63	0.0122	0.26	0.1315	39.89
11	16	14.7	0.92	0.0032	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	10	0.1146	39.43	0.0066	0.14	0.1244	39.56
12	16	17.0	1.06	0.0043	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	11	0.1367	47.02	0.0101	0.21	0.1511	47.23
13	16	19.3	1.20	0.0053	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	13	0.1654	56.90	0.0096	0.20	0.1803	57.10
14	18	15.6	0.87	0.0042	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	11	0.1552	53.37	0.0068	0.14	0.1662	53.52
15	18	17.9	0.99	0.0055	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	13	0.1885	64.84	0.0064	0.14	0.2004	64.97
16	18	20.2	1.12	0.0066	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	14	0.2204	75.81	0.0106	0.22	0.2375	76.03
17	20	16.4	0.82	0.0052	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	12	0.2028	69.77	0.0066	0.14	0.2146	69.91
18	20	18.7	0.94	0.0067	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	14	0.2442	84.01	0.0064	0.13	0.2573	84.14
19	20	21.0	1.05	0.0079	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	16	0.2891	99.46	0.0063	0.13	0.3034	99.59
20	22	17.2	0.78	0.0063	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	1	0.0926	36.38	10	0.1621	55.78	0.0090	0.19	0.2700	92.35
21	22	19.4	0.88	0.0079	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	1	0.0999	39.26	12	0.2054	70.66	0.0088	0.18	0.3220	110.10
22	22	21.7	0.99	0.0094	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	1	0.1069	42.02	14	0.2531	87.06	0.0086	0.18	0.3780	129.26
23	24	17.8	0.74	0.0074	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	0	0.0000	0.00	1	0.1106	43.46	11	0.2065	71.04	0.0080	0.17	0.3325	114.67

em que: d – classe de diâmetro à altura do peito (cm); h – altura (m); hd – relação entre a altura e o diâmetro à altura do peito (DAP); $vtoco$ – volume do toco, considerando a altura de corte de 10 cm (m^3); n_k – número de toras por sortimento k ; v_k – volume em metros cúbicos por sortimento k ; R_k – receita obtida por sortimento k , em dólares por m^3 ; $Resíduo$ – em m^3 ; $Rres$ – receita obtida para o resíduo, em dólares por m^3 ; $vtotal$ – volume total em metros cúbicos; $RECEITA$ – receita total considerando todos os sortimentos k e o resíduo, em dólares.

Fonte: o autor.

Deve ser mencionado neste ponto que no modelo de PLIM do MOS, as dimensões dos diferentes tipos de produtos florestais não foram consideradas com flexibilidade. Nas

simulações realizadas não foram utilizadas tolerâncias nas dimensões dos produtos, o que pode ocasionar ineficiências na implementação prática. Como, por exemplo, se para uma determinada tora o d_{fina} estimado for 18,9 cm, esta não será classificada como sortimento S4 ($d_{fina} \geq 19$ cm).

Considerando que os sortimentos com as maiores dimensões também são melhor remunerados, os resultados da otimização que prioriza a dimensão dos sortimentos e o que maximiza a renda foram semelhantes (Tabela 26). Esse fato, entretanto, pode ser alterado com a variação dos preços atribuídos aos sortimentos ou seus respectivos critérios de classificação.

Tabela 26 – Sortimentos otimizados para maximização da receita de *Tectona grandis* L.f., índice de sítio 21, para a região centro-sul do estado de Mato Grosso

d	h	h/d	v _{toco}	S1		S2		S3		S4		S5		V _{total}	Resíduo
				n	m ³	n	m ³	n	m ³	n	m ³	n	m ³		
10	11,1	1,11	0,0008	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	3	0,0195	0,0375	0,0171
	13,4	1,34	0,0015	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	5	0,0310	0,0473	0,0149
	15,7	1,57	0,0020	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	6	0,0393	0,0583	0,0169
12	12,5	1,04	0,0015	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	6	0,0464	0,0603	0,0123
	14,8	1,23	0,0023	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	8	0,0621	0,0748	0,0104
	17,1	1,42	0,0030	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	9	0,0745	0,0909	0,0133
14	13,7	0,98	0,0023	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	8	0,0770	0,0891	0,0098
	16,0	1,14	0,0033	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	10	0,0974	0,1094	0,0087
	18,2	1,30	0,0041	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	11	0,1152	0,1315	0,0122
16	14,7	0,92	0,0032	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	10	0,1146	0,1244	0,0066
	17,0	1,06	0,0043	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	11	0,1367	0,1511	0,0101
	19,3	1,20	0,0053	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	13	0,1654	0,1803	0,0096
18	15,6	0,87	0,0042	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	11	0,1552	0,1662	0,0068
	17,9	0,99	0,0055	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	13	0,1885	0,2004	0,0064
	20,2	1,12	0,0066	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	14	0,2204	0,2375	0,0106
20	16,4	0,82	0,0052	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	12	0,2028	0,2146	0,0066
	18,7	0,94	0,0067	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	14	0,2442	0,2573	0,0064
	21,0	1,05	0,0079	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	16	0,2891	0,3034	0,0063
22	17,2	0,78	0,0063	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	1	0,0926	10	0,1621	0,2700	0,0090
	19,4	0,88	0,0079	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	1	0,0999	12	0,2054	0,3220	0,0088
	21,7	0,99	0,0094	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	1	0,1069	14	0,2531	0,3780	0,0086
24	17,8	0,74	0,0074	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	1	0,1106	11	0,2065	0,3325	0,0080
	20,1	0,84	0,0093	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	2	0,1964	11	0,1831	0,3947	0,0060
	22,4	0,93	0,0110	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	2	0,2103	13	0,2343	0,4617	0,0061

(Continua)

Tabela 26 – Sortimentos otimizados para maximização da receita de *Tectona grandis* L.f., índice de sítio 21, para a região centro-sul do estado de Mato Grosso

(Continuação)

d	h	h/d	V _{toco}	S1		S2		S3		S4		S5		V _{total}	Resíduo
				n	m ³	n	m ³	n	m ³	n	m ³	n	m ³		
26	18,4	0,71	0,0086	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	2	0,2147	10	0,1741	0,4021	0,0048
	20,7	0,80	0,0107	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	3	0,3070	9	0,1502	0,4757	0,0076
	23,0	0,88	0,0126	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	3	0,3310	11	0,2031	0,5545	0,0078
	19,0	0,68	0,0099	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	3	0,3295	8	0,1339	0,4792	0,0059
28	21,3	0,76	0,0122	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	3	0,3579	10	0,1887	0,5650	0,0062
	23,5	0,84	0,0143	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	4	0,4673	10	0,1703	0,6567	0,0048
	19,5	0,65	0,0112	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	3	0,3809	9	0,1675	0,5639	0,0043
30	21,8	0,73	0,0138	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	4	0,4968	8	0,1449	0,6628	0,0074
	24,1	0,80	0,0161	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	5	0,6168	8	0,1297	0,7684	0,0058
	20,0	0,63	0,0126	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	4	0,5195	7	0,1190	0,6562	0,0050
32	22,3	0,70	0,0155	0	0,0000	0	0,0000	1	0,2104	3	0,3581	9	0,1800	0,7694	0,0054
	24,6	0,77	0,0180	0	0,0000	0	0,0000	1	0,2229	4	0,4831	8	0,1569	0,8899	0,0090
	20,5	0,60	0,0141	0	0,0000	0	0,0000	1	0,2228	3	0,3682	7	0,1434	0,7565	0,0080
34	22,8	0,67	0,0172	0	0,0000	0	0,0000	1	0,2371	4	0,4970	7	0,1275	0,8850	0,0062
	25,0	0,74	0,0199	0	0,0000	0	0,0000	2	0,4224	4	0,4612	7	0,1130	1,0213	0,0048
	20,9	0,58	0,0156	0	0,0000	0	0,0000	1	0,2496	4	0,5012	6	0,0949	0,8649	0,0036
36	23,2	0,64	0,0189	0	0,0000	0	0,0000	2	0,4469	3	0,3818	8	0,1579	1,0096	0,0041
	25,5	0,71	0,0219	0	0,0000	0	0,0000	2	0,4732	4	0,5243	7	0,1360	1,1630	0,0075
	21,4	0,56	0,0171	0	0,0000	0	0,0000	2	0,4680	3	0,3760	6	0,1146	0,9815	0,0058
38	23,6	0,62	0,0207	0	0,0000	0	0,0000	3	0,6691	3	0,3488	6	0,1005	1,1436	0,0045
	25,9	0,68	0,0240	0	0,0000	0	0,0000	3	0,7137	4	0,4865	5	0,0827	1,3150	0,0082
	21,7	0,54	0,0187	0	0,0000	0	0,0000	2	0,5193	3	0,4234	7	0,1418	1,1066	0,0034
40	24,0	0,60	0,0226	0	0,0000	0	0,0000	3	0,7426	3	0,3944	6	0,1205	1,2870	0,0069
	26,3	0,66	0,0261	0	0,0000	0	0,0000	4	0,9715	3	0,3691	6	0,1055	1,4776	0,0054
	22,1	0,53	0,0203	0	0,0000	0	0,0000	3	0,7651	3	0,3718	5	0,0796	1,2402	0,0035
42	24,4	0,58	0,0245	0	0,0000	0	0,0000	4	0,9998	2	0,2632	7	0,1485	1,4403	0,0041
	26,7	0,63	0,0283	0	0,0000	0	0,0000	4	1,0731	3	0,4160	6	0,1257	1,6510	0,0079
	22,5	0,51	0,0220	0	0,0000	0	0,0000	4	1,0176	2	0,2419	5	0,0957	1,3827	0,0055
44	24,7	0,56	0,0265	0	0,0000	0	0,0000	4	1,1006	3	0,3896	5	0,0825	1,6034	0,0042
	27,0	0,61	0,0306	0	0,0000	1	0,5767	3	0,7097	3	0,4103	6	0,1047	1,8356	0,0036
	22,8	0,50	0,0237	0	0,0000	0	0,0000	4	1,1168	2	0,2719	6	0,1189	1,5341	0,0028
46	25,1	0,55	0,0286	0	0,0000	1	0,5992	3	0,7110	2	0,2885	6	0,1424	1,7766	0,0069
	27,4	0,59	0,0329	0	0,0000	1	0,6291	4	0,9704	2	0,2692	6	0,1243	2,0314	0,0054
	23,1	0,48	0,0255	0	0,0000	1	0,6180	3	0,7016	2	0,2576	5	0,0889	1,6947	0,0030
48	25,4	0,53	0,0307	0	0,0000	1	0,6517	4	0,9614	2	0,2385	4	0,0711	1,9602	0,0069
	27,7	0,58	0,0353	0	0,0000	1	0,6837	4	1,0646	3	0,3896	4	0,0601	2,2387	0,0054
	23,5	0,47	0,0273	0	0,0000	1	0,6704	3	0,7681	2	0,2884	5	0,1057	1,8646	0,0047
50	25,7	0,51	0,0328	0	0,0000	1	0,7064	4	1,0527	2	0,2682	5	0,0907	2,1544	0,0036
	28,0	0,56	0,0377	0	0,0000	2	1,2626	3	0,7494	2	0,2880	6	0,1171	2,4579	0,0030

(Continua)

Tabela 26 – Sortimentos otimizados para maximização da receita de *Tectona grandis* L.f., índice de sítio 21, para a região centro-sul do estado de Mato Grosso

(Continuação)

d	h	h/d	V _{toco}	S1		S2		S3		S4		S5		V _{total}	Resíduo
				n	m ³	n	m ³	n	m ³	n	m ³	n	m ³		
	23,8	0,46	0,0292	0	0,0000	1	0,7249	4	1,0228	1	0,1360	5	0,1243	2,0441	0,0069
52	26,0	0,50	0,0350	0	0,0000	2	1,2882	3	0,7238	2	0,2464	4	0,0621	2,3593	0,0038
	28,3	0,54	0,0402	0	0,0000	2	1,3656	4	1,0045	1	0,1367	6	0,1374	2,6890	0,0046
	24,0	0,45	0,0311	0	0,0000	2	1,3044	2	0,5044	2	0,2988	4	0,0873	2,2333	0,0072
54	26,3	0,49	0,0372	0	0,0000	2	1,3901	3	0,7915	2	0,2765	4	0,0742	2,5752	0,0056
	28,6	0,53	0,0428	0	0,0000	3	1,9828	2	0,5005	2	0,3005	5	0,1010	2,9324	0,0048
	24,3	0,43	0,0330	0	0,0000	2	1,4048	3	0,7443	1	0,1377	5	0,1093	2,4324	0,0033
56	26,6	0,47	0,0395	0	0,0000	3	1,9954	2	0,4690	1	0,1523	6	0,1432	2,8022	0,0028
	28,9	0,52	0,0454	0	0,0000	3	2,1364	3	0,7423	1	0,1392	5	0,1182	3,1883	0,0068
	24,6	0,42	0,0350	0	0,0000	2	1,5088	3	0,8114	1	0,1536	5	0,1278	2,6415	0,0049
58	26,9	0,46	0,0418	0	0,0000	3	2,1462	2	0,5131	2	0,2763	4	0,0609	3,0407	0,0025
	29,1	0,50	0,0480	1	1,1734	2	1,2502	3	0,7489	1	0,1323	5	0,1005	3,4569	0,0036
	24,9	0,41	0,0370	0	0,0000	3	2,1359	2	0,4630	1	0,1345	4	0,0856	2,8610	0,0050
60	27,1	0,45	0,0442	1	1,1969	2	1,2284	2	0,5147	1	0,1629	5	0,1370	3,2908	0,0068
	29,4	0,49	0,0507	1	1,2540	2	1,3454	3	0,8179	1	0,1481	5	0,1173	3,7385	0,0052

em que: d – classe de diâmetro à altura do peito (cm); h – altura (m); h/d – relação entre a altura e o diâmetro à altura do peito (DAP); V_{toco} – volume do toco, considerando a altura de corte de 10 cm (m³); n – número de toras por sortimento; m³ - volume em metros cúbicos por sortimento; S1 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 49 cm, e 4,6 m de comprimento; S2 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 39 cm, e 3,7 m de comprimento; S3 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 29 cm, e 2,4 m de comprimento; S4 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 19 cm, e 2,4 m de comprimento; S5 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 7 cm, e 1,0 m de comprimento; Resíduo – em m³.
Fonte: o autor.

Como resultado da renda maximizada, apresenta-se a opção que o produtor florestal teria de utilizar na íntegra seu poder de mercado. Neste caso, ofereceria ao mesmo os volumes de cada tipo de produto de modo a maximizar a receita de suas florestas, assumindo, é claro, que este mercado absorveria a totalidade destes volumes mantendo os preços utilizados na simulação.

Quando o objetivo da maximização é o maior aproveitamento do volume, os resultados são discrepantes ao serem comparados com os da priorização da dimensão dos sortimentos e os da maximização da renda (Tabela 27). Na tabela de sortimento para maximização do volume se verificou a priorização dos menores sortimentos, o que reforça, novamente, que os mesmos são mais flexíveis para minimizar os resíduos provenientes das combinações de sortimentos ao longo do fuste.

Tabela 27 – Sortimentos otimizados para maximização do volume de *Tectona grandis* L.f., índice de sítio 21, para a região centro-sul do estado de Mato Grosso

d	h	h/d	V _{toco}	S1		S2		S3		S4		S5		V _{total}	Resíduo
				n	m ³	n	m ³	n	m ³	n	m ³	n	m ³		
	11,1	1,11	0,0008	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	3	0,0195	0,0375	0,0171
10	13,4	1,34	0,0015	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	5	0,0310	0,0473	0,0149
	15,7	1,57	0,0020	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	6	0,0393	0,0583	0,0169
	12,5	1,04	0,0015	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	6	0,0464	0,0603	0,0123
12	14,8	1,23	0,0023	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	8	0,0621	0,0748	0,0104
	17,1	1,42	0,0030	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	9	0,0745	0,0909	0,0133
	13,7	0,98	0,0023	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	8	0,0770	0,0891	0,0098
14	16,0	1,14	0,0033	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	10	0,0974	0,1094	0,0087
	18,2	1,30	0,0041	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	11	0,1152	0,1315	0,0122
	14,7	0,92	0,0032	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	10	0,1146	0,1244	0,0066
16	17,0	1,06	0,0043	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	11	0,1367	0,1511	0,0101
	19,3	1,20	0,0053	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	13	0,1654	0,1803	0,0096
	15,6	0,87	0,0042	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	11	0,1552	0,1662	0,0068
18	17,9	0,99	0,0055	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	13	0,1885	0,2004	0,0064
	20,2	1,12	0,0066	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	14	0,2204	0,2375	0,0106
	16,4	0,82	0,0052	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	12	0,2028	0,2146	0,0066
20	18,7	0,94	0,0067	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	14	0,2442	0,2573	0,0064
	21,0	1,05	0,0079	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	16	0,2891	0,3034	0,0063
	17,2	0,78	0,0063	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	13	0,2577	0,2700	0,0060
22	19,4	0,88	0,0079	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	15	0,3081	0,3220	0,0059
	21,7	0,99	0,0094	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	17	0,3627	0,3780	0,0060
	17,8	0,74	0,0074	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	14	0,3200	0,3325	0,0051
24	20,1	0,84	0,0093	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	16	0,3803	0,3947	0,0052
	22,4	0,93	0,0110	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	18	0,4454	0,4617	0,0053
	18,4	0,71	0,0086	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	2	0,2147	10	0,1741	0,4021	0,0048
26	20,7	0,80	0,0107	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	2	0,1873	12	0,2727	0,4757	0,0049
	23,0	0,88	0,0126	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	2	0,2471	14	0,2897	0,5545	0,0052
	19,0	0,68	0,0099	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	1	0,1050	13	0,3593	0,4792	0,0050
28	21,3	0,76	0,0122	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	1	0,1600	15	0,3875	0,5650	0,0053
	23,5	0,84	0,0143	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	4	0,4673	10	0,1703	0,6567	0,0048
	19,5	0,65	0,0112	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	3	0,3809	9	0,1675	0,5639	0,0043
30	21,8	0,73	0,0138	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	3	0,4126	11	0,2319	0,6628	0,0046
	24,1	0,80	0,0161	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	3	0,4139	13	0,3334	0,7684	0,0050
	20,0	0,63	0,0126	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	2	0,3295	12	0,3099	0,6562	0,0042
32	22,3	0,70	0,0155	0	0,0000	0	0,0000	1	0,2104	1	0,1395	14	0,3995	0,7694	0,0046
	24,6	0,77	0,0180	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	2	0,3002	16	0,5667	0,8899	0,0050

(Continua)

Tabela 27 – Sortimentos otimizados para maximização do volume de *Tectona grandis* L.f., índice de sítio 21, para a região centro-sul do estado de Mato Grosso

(Continuação)

d	h	h/d	V _{toco}	S1		S2		S3		S4		S5		V _{total}	Resíduo
				n	m ³	n	m ³	n	m ³	n	m ³	n	m ³		
	20,5	0,60	0,0141	0	0,0000	0	0,0000	1	0,2228	0	0,0000	15	0,5157	0,7565	0,0040
34	22,8	0,67	0,0172	0	0,0000	0	0,0000	1	0,2371	0	0,0000	17	0,6263	0,8850	0,0044
	25,0	0,74	0,0199	0	0,0000	0	0,0000	2	0,4224	2	0,1794	12	0,3956	1,0213	0,0041
	20,9	0,58	0,0156	0	0,0000	0	0,0000	1	0,2496	4	0,5012	6	0,0949	0,8649	0,0036
36	23,2	0,64	0,0189	0	0,0000	0	0,0000	1	0,2577	4	0,5710	8	0,1579	1,0096	0,0041
	25,5	0,71	0,0219	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	5	0,7996	10	0,3369	1,1630	0,0046
	21,4	0,56	0,0171	0	0,0000	0	0,0000	1	0,1901	0	0,0000	16	0,7704	0,9815	0,0039
38	23,6	0,62	0,0207	0	0,0000	0	0,0000	3	0,6691	1	0,0816	11	0,3685	1,1436	0,0037
	25,9	0,68	0,0240	0	0,0000	0	0,0000	1	0,1868	3	0,6183	13	0,4817	1,3150	0,0042
	21,7	0,54	0,0187	0	0,0000	0	0,0000	1	0,2118	4	0,6707	7	0,2020	1,1066	0,0034
40	24,0	0,60	0,0226	0	0,0000	0	0,0000	1	0,1849	4	0,7690	9	0,3066	1,2870	0,0039
	26,3	0,66	0,0261	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	3	0,6407	16	0,8071	1,4776	0,0037
	22,1	0,53	0,0203	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	6	1,1205	5	0,0959	1,2402	0,0035
42	24,4	0,58	0,0245	0	0,0000	0	0,0000	4	0,9998	0	0,0000	12	0,4126	1,4403	0,0033
	26,7	0,63	0,0283	0	0,0000	0	0,0000	1	0,2006	3	0,8725	14	0,5458	1,6510	0,0039
	22,5	0,51	0,0220	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	2	0,4156	15	0,9415	1,3827	0,0035
44	24,7	0,56	0,0265	0	0,0000	0	0,0000	2	0,4327	3	0,7828	10	0,3580	1,6034	0,0034
	27,0	0,61	0,0306	0	0,0000	1	0,5690	3	0,7174	3	0,4103	6	0,1047	1,8356	0,0036
	22,8	0,50	0,0237	0	0,0000	0	0,0000	4	1,1168	2	0,2188	6	0,1720	1,5341	0,0028
46	25,1	0,55	0,0286	0	0,0000	1	0,5992	0	0,0000	2	0,4072	14	0,7387	1,7766	0,0030
	27,4	0,59	0,0329	0	0,0000	0	0,0000	3	0,7576	1	0,3106	15	0,9271	2,0314	0,0032
	23,1	0,48	0,0255	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	2	0,4701	16	1,1964	1,6947	0,0027
48	25,4	0,53	0,0307	0	0,0000	1	0,6517	1	0,1866	2	0,4906	12	0,5977	1,9602	0,0029
	27,7	0,58	0,0353	0	0,0000	0	0,0000	3	0,7331	2	0,6296	13	0,8377	2,2387	0,0032
	23,5	0,47	0,0273	0	0,0000	1	0,6704	0	0,0000	1	0,1916	15	0,9724	1,8646	0,0029
50	25,7	0,51	0,0328	0	0,0000	1	0,7064	4	1,0030	0	0,0000	10	0,4095	2,1544	0,0028
	28,0	0,56	0,0377	0	0,0000	2	1,2626	2	0,4485	3	0,5558	6	0,1502	2,4579	0,0030
	23,8	0,46	0,0292	0	0,0000	1	0,7249	0	0,0000	2	0,4689	13	0,8185	2,0441	0,0027
52	26,0	0,50	0,0350	0	0,0000	0	0,0000	2	0,4938	2	0,5995	14	1,2280	2,3593	0,0030
	28,3	0,54	0,0402	0	0,0000	0	0,0000	3	1,2725	4	0,9201	9	0,4533	2,6890	0,0029
	24,0	0,45	0,0311	0	0,0000	1	0,7813	0	0,0000	3	0,7305	11	0,6879	2,2333	0,0024
54	26,3	0,49	0,0372	0	0,0000	2	1,3901	1	0,2067	3	0,7396	7	0,1988	2,5752	0,0027
	28,6	0,53	0,0428	0	0,0000	1	0,8605	5	1,3874	1	0,3956	8	0,2432	2,9324	0,0030
	24,3	0,43	0,0330	0	0,0000	0	0,0000	1	0,2774	2	0,5324	15	1,5870	2,4324	0,0025
56	26,6	0,47	0,0395	0	0,0000	0	0,0000	5	1,5845	1	0,4379	10	0,7378	2,8022	0,0024
	28,9	0,52	0,0454	0	0,0000	1	0,9237	5	1,4390	2	0,6097	6	0,1678	3,1883	0,0028

(Continua)

Tabela 27 – Sortimentos otimizados para maximização do volume de *Tectona grandis* L.f., índice de sítio 21, para a região centro-sul do estado de Mato Grosso

(Continuação)

d	h	h/d	V _{toco}	S1		S2		S3		S4		S5		V _{total}	Resíduo
				n	m ³	n	m ³	n	m ³	n	m ³	n	m ³		
58	24,6	0,42	0,0350	0	0,0000	1	0,9004	1	0,1967	1	0,2550	14	1,2520	2,6415	0,0025
	26,9	0,46	0,0418	0	0,0000	1	0,9458	3	0,7606	2	0,7689	9	0,5212	3,0407	0,0025
	29,1	0,50	0,0480	0	0,0000	0	0,0000	4	1,3079	3	1,3032	10	0,7951	3,4569	0,0028
	24,9	0,41	0,0370	0	0,0000	3	2,1359	0	0,0000	2	0,4630	7	0,2230	2,8610	0,0021
60	27,1	0,45	0,0442	0	0,0000	0	0,0000	3	1,0264	2	0,7417	13	1,4761	3,2908	0,0025
	29,4	0,49	0,0507	0	0,0000	0	0,0000	6	2,2564	2	1,0624	8	0,3666	3,7385	0,0025

em que: d – classe de diâmetro à altura do peito (cm); h – altura (m); h/d – relação entre a altura e o diâmetro à altura do peito (DAP); V_{toco} – volume do toco, considerando a altura de corte de 10 cm (m³); n – número de toras por sortimento; m³ - volume em metros cúbicos por sortimento; S1 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 49 cm, e 4,6 m de comprimento; S2 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 39 cm, e 3,7 m de comprimento; S3 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 29 cm, e 2,4 m de comprimento; S4 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 19 cm, e 2,4 m de comprimento; S5 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 7 cm, e 1,0 m de comprimento; Resíduo – em m³.
Fonte: o autor.

Quando se priorizam as dimensões na elaboração da tabela de sortimento, verifica-se em todas as classes de DAP a possibilidade de uso alternativo da madeira, dando a ela o destino economicamente viável, dependendo da demanda da empresa. Esta situação não é garantida quando se otimiza os fustes com o objetivo de maximizar a renda ou o volume.

Ao aplicar o valor de cada sortimento para as tabelas resultantes das otimizações, fica evidente a diferença da maximização do volume em relação as demais otimizações, mesmo a redução do resíduo sendo de aproximadamente 26% (Tabela 28). Logo, só se justifica ao produtor priorizar a minimização do resíduo se for necessário a remoção do mesmo e os custos com a atividade reduzir o lucro líquido da produção.

Tabela 28 – Resumo da otimização dos sortimentos para *Tectona grandis* L.f. pelo modelo de Clark III et al. (1991) com efeito misto, índice de sítio 21, para a região centro-sul do estado de Mato Grosso

Critério	Receita (US\$)	Resíduo (m ³)
Priorizar dimensão	40.644,01	0,5574
Maximizar a receita	40.713,31	0,5183
Maximizar o volume	37.079,97	0,4104

Fonte: o autor.

A priorização da dimensão dos produtos no traçamento de toras no campo para cada árvore garante a otimização do sortimento na idade de corte em função da oferta, mas ignora a demanda dos clientes. Ao otimizar o sortimento levando em consideração a demanda dos clientes, devem ser oferecidas várias alternativas de sortimento ao MOS, mesmo que elas sejam sub-ótimas para uma determinada árvore ou classe de DAP em particular, a fim de evitar situações de infactibilidade na demanda pelos multiprodutos.

Como consequência deste processo, surgem produtos das mais variadas dimensões dentro de um intervalo, o que pode ser considerado como inaplicável operacionalmente na prática. Entretanto, vale ressaltar que a finalidade de conhecer o comportamento da floresta frente às otimizações é estabelecer as combinações ótimas de sortimentos que podem ser atingidas e, desta forma, fornecer ao produtor florestal informações técnicas e econômicas adequadas para o planejamento florestal.

Para o produtor florestal, a grande vantagem de utilizar um sistema de análise, simulação e otimização do sortimento, é o fato de poder avaliar diversos cenários de produção, alterar as dimensões dos produtos e avaliar os resultados, incluir e excluir determinados talhões, produtos, clientes da análise, e tudo de dentro do escritório. Em outras palavras, é possível, de modo virtual, trasladar todos os projetos e talhões cujo planejamento está sendo executado, além dos clientes e os produtos por eles demandados, para dentro de um microcomputador e, em pouco tempo, determinar o sortimento conjunto de todas as árvores avaliando os resultados, tanto técnica como financeiramente.

Contudo, vale lembrar que um modelo, por melhor ajustado e calibrado que seja, será sempre uma representação abstrata da realidade e os resultados do sistema devem ser tomados como um guia de colheita e sortimento, uma vez que nunca poderão ser encontradas na floresta todas as árvores com as dimensões exatas tal como as utilizadas nas simulações (ARCE, 2000). E, mesmo que algumas delas fossem encontradas, provavelmente, seus volumes e seus afilamentos não seriam exatamente os preditos pelas equações compatíveis de volume e afilamento utilizadas no MTT do sistema.

4.7.4 Cenários

Para ilustrar a otimização dos sortimentos foram gerados dois cenários com a simulação da distribuição de diâmetros proposta por Favalessa [2018]. No primeiro cenário foram estimadas as frequências das classes diamétricas nas ocasiões em que ocorreram desbastes – 5, 8 e 11 anos (Tabela 29); enquanto no segundo cenário foram estimadas as frequências simulando corte raso aos 16 anos em diferentes sítios – ruim, intermediário e bom – 17, 21 e 25 metros (Tabela 30).

Tanto as informações referentes ao volume que serão apresentadas pelas otimizações, quanto aquelas referentes ao número de toras por tipo de sortimento, devem ser analisadas cautelosamente, uma vez que as frequências nas classes de diâmetros, utilizadas como dados de entrada pelo sistema, provêm de um sistema de equações, ou seja, possuem erros de estimativa, além dos erros inerentes das equações dos módulos complementares e do MTT.

Tabela 29 – Número de árvores estimadas por hectare em povoamentos de *Tectona grandis* L.f. na ocasião de desbastes para o sitio de 21 metros para compor o primeiro cenário

Classe de diâmetro (cm)	Número de árvores desbastadas por hectare		
	5 anos	8 anos	11 anos
4	8		
6	8		
8	8		
10	23		
12	84	4	
14	165	7	
16	127	21	2
18	24	45	5
20	9	53	14
22		27	27
24		7	34
26		3	25
28			5
30			2

Fonte: Adaptado de Favalessa [2018].

Tabela 30 – Número de árvores estimadas por hectare em povoamentos de *Tectona grandis* L.f., simulando corte raso aos 16 anos para os sítios de 17, 21 e 25 metros para compor o segundo cenário

Classe de diâmetro (cm)	17 metros	21 metros	25 metros
22	51		
24	79	26	
26	78	50	21
28	35	74	41
30	6	72	65
32		36	75
34		6	52
36		2	15
38		2	1

Fonte: Adaptado de Favalessa [2018].

As rendas apresentadas nas simulações não estão deflacionadas para um período comum devendo-se, para fins de comparação, fazer a análise econômica, o que será implementado em módulo futuro neste Simulador.

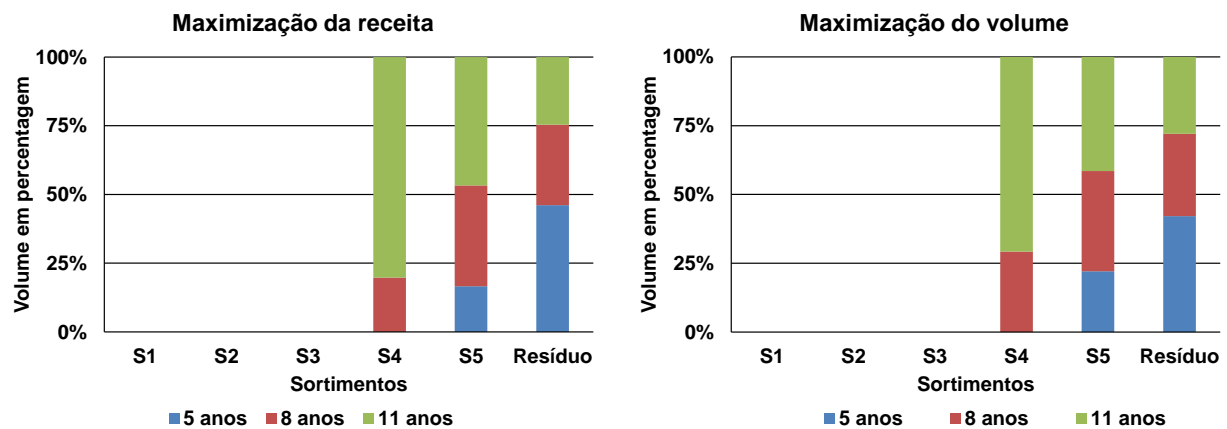
4.7.4.1 Cenário 1: produtos de desbastes em diferentes idades

Tanto para maximização da receita como do volume, verificou o deslocamento no volume com o aumento das dimensões das árvores até o sortimento S4 (Figura 28). Porém, na maximização da receita, toras deste produto só foram possíveis de serem alcançadas nas classes de 22 cm ou mais de DAP com relação $h/d < 0,9$, fato observado nas idades de oito e onze anos (em destaque no Apêndice P). Ao maximizar o volume das árvores desbastadas, verifica-se a utilização do sortimento S4 apenas nas classes de DAP com centro de classe superior ou igual a 26 cm e relação $h/d \leq 0,8$ (em destaque no Apêndice Q).

Examinando os valores da relação h/d , verifica a possibilidade de combinar sortimentos com maiores dimensões com a redução da relação h/d . Reiterando que a altura das árvores é reflexo da qualidade do sítio e o diâmetro é diretamente afetado pelo o regime de manejo aplicado. Neste cenário, no primeiro desbaste, aos cinco anos, os resultados das combinações de sortimentos não diferem entre as otimizações uma vez que as árvores com pequenas dimensões limitam as possibilidades de sortimentos. Já

as árvores provenientes dos desbastes aos oito e onze anos, sob efeito da redução da competição proveniente de desbastes anteriores, possibilitam diferentes traçamentos.

Figura 28 – Maximização da receita e do volume dos sortimentos da árvore central na ocasião de desbastes para o sitio de 21 metros, para *Tectona grandis* L.f. pelo modelo de Clark III et al. (1991), com efeito misto, região centro-sul do estado de Mato Grosso



em que: S1 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 49 cm, e 4,6 m de comprimento; S2 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 39 cm, e 3,7 m de comprimento; S3 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 29 cm, e 2,4 m de comprimento; S4 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 19 cm, e 2,4 m de comprimento; S5 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 7 cm, e 1,0 m de comprimento.

Fonte: o autor.

As receitas otimizadas dos desbastes foram semelhantes, mas com o objetivo de minimizar os resíduos obtidos pelos desbastes se observa uma redução entre as receitas dos volumes desbastados por sortimento para cada uma das idades (Tabela 31). Nesta otimização se prioriza a utilização de sortimento S5 por possuir menor dimensão e ser mais flexível para o melhor aproveitamento do fuste.

Considerando que o sortimento S5 é único produto com d_{fina} entre 7 e 19 cm, e que até a menor das árvores comerciais produz pelo menos uma tora deste tipo de produto - se não for assim, a árvore não seria comercial -, é claro que em todas as classes de DAP, idade e sítios se espera uma certa quantidade de toras deste produto.

Tabela 31 – Resumo das receitas obtidas pela maximização da receita e do volume dos desbastes por sortimento de *Tectona grandis* L.f. pelo modelo de Clark III et al. (1991), com efeito misto, para o sítio de 21 metros, região centro-sul do estado de Mato Grosso

Idade	S1	S2	S3	S4	S5	S _{resíduo}	Total	Resíduo
Maximização da receita (US\$.ha⁻¹)								(m³.ha⁻¹)
5 anos	0,00	0,00	0,00	0,00	15.865,17	92,98	15.958,14	4,4274
8 anos	0,00	0,00	0,00	1.962,30	11.180,26	26,23	13.168,79	1,2492
11 anos	0,00	0,00	0,00	7.794,70	7.351,01	17,72	15.163,43	0,8439
Maximização do volume (US\$.ha⁻¹)								(m³.ha⁻¹)
5 anos	0,00	0,00	0,00	0,00	15.865,17	92,97	15.958,14	4,4273
8 anos	0,00	0,00	0,00	220,87	12.736,25	24,30	12.981,42	1,1571
11 anos	0,00	0,00	0,00	2.479,24	12.074,66	13,39	14.567,29	0,6377

em que: S1 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 49 cm, e 4,6 m de comprimento; S2 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 39 cm, e 3,7 m de comprimento; S3 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 29 cm, e 2,4 m de comprimento; S4 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 19 cm, e 2,4 m de comprimento; S5 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 7 cm, e 1,0 m de comprimento; S_{resíduo} – receita do resíduo; Total – receita total dos sortimentos obtidos e resíduo; m³.ha⁻¹ - volume em metros cúbicos por hectare.

Fonte: o autor.

Essa pequena diferença entre as receitas das otimizações se deve ao número de árvores desbastadas aos cinco, oito e onze anos, respectivamente, 456 árvores.ha⁻¹, 167 árvores.ha⁻¹ e 114 árvores.ha⁻¹. Com a redução do número de árvores, diminuiu o volume e, conseqüentemente, a receita, mas apesar do número reduzido de árvores aos onze anos, foi possível a combinação com sortimento melhor remunerado (neste caso, sortimento S4).

Recordando que o MOS não considera o horizonte de planejamento na determinação das receitas, logo, o sistema fornece resultados para análise futura da receita bruta com os custos que envolvem a produção, subsidiando as atividades de colheita e abastecimento em anos futuros.

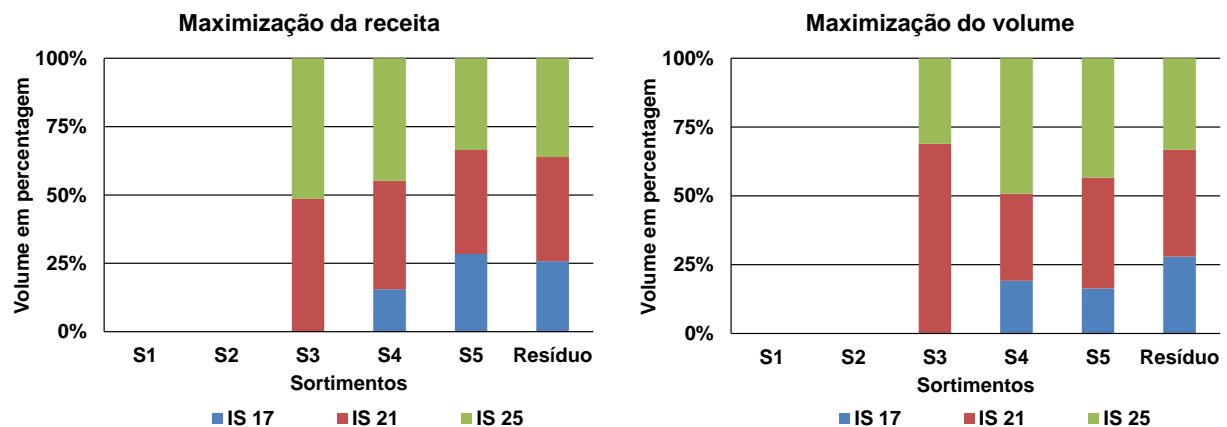
4.7.4.2 Cenário 2: produção em diferentes sítios

Ao analisar os resultados das otimizações, considerando diferentes sítios, verifica-se o deslocamento no número e volume de toras com o aumento das dimensões das

árvores até o sortimento S3 (Figura 29); mas para a maximização do volume, prioriza-se a utilização dos menores sortimentos.

Verifica-se que nos três sítios, para todas as classes de DAP, a relação h/d foi menor que 0,9 (Apêndices R e S), mas não necessariamente a menor relação h/d significa melhor remuneração do fuste. Por exemplo, na classe com centro de 36 cm de DAP, sítio 21 com relação h/d de 0,64, apresenta duas toras do sortimento S3, três toras do sortimento S4, oito toras do sortimento S5 e 0,0041 m³ de resíduo; enquanto que o sítio 25 com relação h/d de 0,70, apresenta duas toras do sortimento S3, quatro toras do sortimento S4, sete toras do sortimento S5 e 0,0058 m³ de resíduo (em destaque nos Apêndices R e S). Nos melhores sítios, em função das maiores alturas, algumas classes de DAP possuem diferentes combinações de número de toras por sortimento.

Figura 29 – Maximização da receita e do volume dos sortimentos para *Tectona grandis* L.f. pelo modelo de Clark III et al. (1991), com efeito misto, simulando corte raso aos 16 anos para os sítios de 17, 21 e 25 metros, região centro-sul do estado de Mato Grosso



em que: S1 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 49 cm, e 4,6 m de comprimento; S2 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 39 cm, e 3,7 m de comprimento; S3 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 29 cm, e 2,4 m de comprimento; S4 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 19 cm, e 2,4 m de comprimento; S5 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 7 cm, e 1,0 m de comprimento.

Fonte: o autor.

Quando se analisa a receita da produção obtida do corte raso aos 16 anos, em ambas otimizações, reforça-se a afirmação que os melhores sítios são mais produtivos e, conseqüentemente, apresentam maior receita bruta (Tabela 32). Esses efeitos de sítio

são mais óbvios aparecem quando é feita uma comparação entre as categorias gerais de locais “bons” e “ruins”, com árvores de locais “ruins” apresentando as formas mais diminutas e cônicas, portanto, menos desejáveis (METZGER, 1895 apud LARSON, 1963).

Ao analisar a maximização do volume, verifica-se que redução das receitas não foram tão expressivas, aproximadamente 2%, 4% e 6% para os sítios 17, 21 e 25, respectivamente. O que justifica a priorização da minimização do resíduo quando os mesmos incorporam custos ao manejo dos povoamentos.

Ciente que o corte raso aos 16 anos foi apenas uma simulação com dados proveniente da distribuição diamétrica de Favalessa [2018], fica evidente que para se obter sortimentos com relevância internacional são necessárias rotações superiores, aproximadamente 25 anos (COUTINHO, 2017). Considerando o sítio de 21 metros, para se obter sortimentos S1 ($d_{fina} = 49$ cm) e S2 ($d_{fina} = 39$ cm) é necessário alcançar DAP superiores ou iguais a 58 cm e 44 cm, respectivamente (Tabela 25, item 4.6.3).

Tabela 32 – Resumo das receitas obtidas pela maximização da receita e do volume dos sortimentos para *Tectona grandis* L.f. pelo modelo de Clark III et al. (1991), com efeito misto, simulando corte raso aos 16 anos para os sítios de 17, 21 e 25 metros, região centro-sul do estado de Mato Grosso

Sítio	S1	S2	S3	S4	S5	S _{resíduo}	Total	Resíduo
Maximização da receita (US\$.ha⁻¹)								(m³.ha⁻¹)
17	0,00	0,00	0,00	17.726,52	16.400,70	33,91	34.161,13	1,6147
21	0,00	0,00	4.963,78	39.318,82	15.282,13	37,28	59.602,01	1,7754
25	0,00	0,00	16.461,89	53.663,53	14.434,05	39,93	84.599,41	1,9016
Maximização do volume (US\$.ha⁻¹)								(m³.ha⁻¹)
17	0,00	0,00	0,00	13.765,75	19.948,82	28,95	33.743,53	1,3787
21	0,00	0,00	4.796,51	22.495,11	30.298,84	27,49	57.617,95	1,3090
25	0,00	0,00	7.500,65	30.952,75	41.516,20	25,98	79.995,58	1,2369

em que: S1 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 49 cm, e 4,6 m de comprimento; S2 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 39 cm, e 3,7 m de comprimento; S3 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 29 cm, e 2,4 m de comprimento; S4 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 19 cm, e 2,4 m de comprimento; S5 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 7 cm, e 1,0 m de comprimento; S_{resíduo} – receita do resíduo; Total – receita total dos sortimentos obtidos e resíduo; m³.ha⁻¹ - volume em metros cúbicos por hectare.

Fonte: o autor.

5. CONCLUSÃO

Com a equação de Schöepfer (1966) foram determinados pontos de mudança da forma de fuste de *Tectona grandis*, em diferentes posições em relação ao estabelecido no modelo de Clark III et al. (1991), para povoamentos na região centro-sul de Mato Grosso.

A equação de Clark III et al. (1991) é a mais adequada para estimar os diâmetros ao longo do tronco de *Tectona grandis*. O ajuste do efeito misto aumenta a flexibilidade do modelo, e este é mais preciso em relação à árvore do que em relação à classe diamétrica. A equação de Clark III et al. (1991), com efeito misto, é acurada para estimar o perfil, principalmente nas extremidades dos troncos, e a integral da função permite estimar o volume do tronco e do seu sortimento.

As funções auxiliares desenvolvidas para operacionalizar o sistema de otimização de sortimento, para maximização do volume ou da receita, possibilitam tanto a entrada de dados como o próprio sortimento a partir de dados de árvore individual, de classes de diâmetro e ainda do povoamento. O sistema é eficiente tanto para avaliação de produtos de desbastes ou de corte final.

O sistema de análise, simulação e otimização de sortimento de *Tectona grandis* para maximização do volume e da receita, a partir da descrição da forma do tronco, permite avaliar diversos cenários para o planejamento técnico e econômico da produção florestal na região centro-sul de Mato Grosso.

BIBLIOGRAFIA

- AGNALDO, A. M.; OCAMPO, O. P. M.; BOWDEN, B.F.; WATERMAN, P.G. Tectograndone, an anthraquinone-naphthoquinone pigment from the leaves of *Tectona grandis*. **Phytochemistry**, Amsterdam, v.33, p.933-935, 1993.
- AHRENS, S.; HOLBERT, D. Uma função para forma de tronco e volume de *Pinus taeda* L. In: **Boletim de pesquisa florestal, unidade regional de pesquisa florestal Centro-Sul**, EMBRAPA, 03, 1981. p.37–68.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorol. Z.**, Fast Track Article, 2013. doi: 10.1127/0941-2948/2013/0507
- AMIDON, E.L. A general taper functional form to predict bole volume for five mixed-conifer species in California. **Forest Science**, Washington, v.30, n.1, p.166-171, 1984.
- ANDRADE, C. M.; FINGER, C. A. G.; THOMAS, C.; SCHNEIDER, P. R. Variação do incremento anual ao longo do fuste de *Pinus taeda* L. em diferentes idades e densidades populacionais. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.17, n.3, p. 239-246, jul-set, 2007.
- ANDRADE, V. C. L. Novos modelos de taper do tipo expoente-forma para descrever o perfil do fuste de árvores. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v.34, n.80, p.1-13, 2014.
- ÂNGELO, H.; SILVA, V. S. de M.; SOUZA, Á. N. de; GATTO, A. C. Aspectos financeiros da produção de teca no Estado de Mato Grosso. **Floresta**, v. 39, n. 1, p. 23–32, 2009.
- APG IV. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. **Botanical Journal of the Linnean Society**, v. 181, p. 1-20, 2016.
- ARCE, J.E. **Um sistema de análise, simulação e otimização do sortimento florestal em função da demanda por multiprodutos e dos custos de transporte**. Curitiba: UFPR – Setor de Ciências Agrárias, 2000, 125p. (Tese – Doutorado em Engenharia Florestal).
- ASSIS, A. L. **Avaliação de modelos polinomiais segmentados e não-segmentados na estimativa de diâmetros e volumes comerciais de *Pinus taeda***. 2000 189p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.
- ASSIS, A. L.; SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M.; OLIVEIRA, A. D. Avaliação de modelos polinomiais não segmentados na estimativa de diâmetros e volumes comerciais de *Pinus taeda*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.12, n.1, p.89-107, 2002.
- ASSIS, A. L.; SOARES, J. R. S.; MELLO, J. M.; WEIMAR, F. A. DONIZETE, A. O. Comparação de modelos polinomiais segmentados e não segmentados na estimativa de diâmetros e volumes ao longo do fuste. **Cerne**, Lavras, v.7, n.1, p.20-42, 2001.
- ASSMANN, E. **The principles of forest yield study**. New York, Pergamon Press. 506p, 1970.

- BALDWIN JUNIOR, V. C.; FEDUCCIA, D. P. Compatible Tree-volume and upper-stem diameter equations for plantation Loblolly Pines in the West Gulf region. **Southern Journal of Applied Forestry**, v. 15, n. 2, p. 92-97, 1991.
- BARBOZA, A. O.; NEVES JUNIOR, F.; BORTOLOTTI, S. L. V.; SOUZA, R. A. de. Programação linear inteira mista e algoritmo genético aplicados ao problema de transferência e estocagem de produtos em uma indústria petrolífera. **Revista Eletrônica Sistemas & Gestão**, v. 10, n. 4, p. 561-574, 2015. doi: 10.7177/sg.2015.v10.n4.a2
- BEHRE, C. E. Preliminary notes on studies of tree form. **Journal of Forestry**, v.21, 507-511, 1923.
- BENBRAHIM, M.; GAVALAND, A. A new stem taper function for short-rotation poplar. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v.18, p.377-383, 2003.
- BERMEJO, I.; CAÑELLAS, I.; SAN MIGUEL, A. Growth and yield models for teak plantations in Costa Rica. **Forest Ecology and Management**, v. 189, p. 97–110, 2004.
- BI, H. Trigonometric variable-form taper equations for Australian Eucalyptus. **Forest Science**, Washington, v. 46, n.3, p. 397-407, 2000.
- BIGING, G. S. Taper equations for second-growth mixed conifers of Northern California. **Forest Science**, Washington, v.30, n.4, p. 1103-1117, 1984.
- BOWDEN, R. O.; HALL, J. D. Simulation optimization research and development. In: MEDEIROS, D. J.; WATSON, E. F.; CARSON, J. S.; MANIVANNAN, M. S. (eds.) **Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference**. Washington, 1998.
- BROWN, H.; PRESCOTT, R. **Applied mixed models in medicine**. 2nd Chichester: J. Wiley, 2006. 455p.
- BRUCE, D.; CURTIS, R. O.; VANCOEVERING, C. Development of a system of taper and volume tables for Red Alder. **Forest Science**, Washington, v.14, n.3, p. 339-350, 1968.
- BYRNE, J. C.; REED, D. D. Complex compatible taper and volume estimation systems for Red and Loblolly Pine. **Forest Science**, Washington, v.32, n.2, p. 423-443, 1986.
- CAMINO, R.; MORALES, J.P. **Las plantaciones de teca en América Latina: mitos y realidades**. Turrialba: CATIE, 2013. 392 p.
- CAMPOS, B.P.F; BINOTI, D.H.B.; SILVA, M.L.; LEITE, H.G.; BINOT, M.L.M.S. Conversão de árvores em multiprodutos da madeira utilizando programação inteira. **R. Árvore**, Viçosa-MG, v.37, n.5, p.881-887, 2013.
- CANCINO, J. **Dendrometría Básica**. Dirección de Docencia. Universidad de Concepción, 171p., 2006.
- CAO, Q. V.; BURKHART, H. E.; MAX, T. A. Evaluating of two methods for cubic-volume prediction of Loblolly Pine to any merchantable limit. **Forest Science**, Washington, v.26, n.1, p. 71-80, 1980.
- CAO, Q.V.; WANG, J. Calibrating fixed- and mixed-effects taper equations. **Forest Ecology and Management**. Amsterdam, v. 262 n. 4, p.671–673, 2011.

- CARDOSO, N. S. **Caracterização da estrutura anatômica da madeira, fenologia e relações com a atividade cambial de árvores de teca (*Tectona grandis* L.f.) - Verbenaceae**. 1991. 117p. Dissertação (Mestrado Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba - SP
- CARVALHO, P. M. **Função de afilamento na estimativa volumétrica e programação matemática no processamento mecânico de toras**. 2010. 51p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.
- CARVALHO, S. P. C. **Estimativa volumétrica por modelo misto e tecnologia laser aerotransportado em plantios clonais de *Eucalyptus* sp.**104f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.
- CASSEL, G. L.; VACCARO, G. L. R. A aplicação de simulação-otimização para definição do mix ótimo de produção de uma indústria metal-mecânica. **Anais..** Encontro Nacional de Engenharia de Produção, XXVII, Foz do Iguaçu, PR, 2007.
- CHAVES, E.; FONSECA, W. **Teca (*Tectona grandis* L.f.) árbol de uso múltiple em América Central**. Turrialba: CATIE, 1991. 47 p. (Série técnica: Informe técnico, 179).
- CHICHORRO, J. F.; RESENDE, J. L. P.; LEITE, H. G. Equações de volume e de taper para quantificar multiprodutos da madeira em floresta atlântica. **Revista Árvore**, Viçosa, v.27, n.6, p.799-809, 2003.
- CLARK III, A.; SOUTER, R. A.; SCHLAEGEL, B. E. Stem profile equations for southern tree species. **Research Paper**, SE-282, USDA Forest Service, 113p., 1991.
- COELHO, L.; MACHADO, T.V.; LEMES, E.M. Produção de teca pelo Brasil afora. **Campo & Negócios**, Uberlândia-MG, v. Floresta, 2017. 7p. Disponível em: < <http://www.revistacampoenegocios.com.br/producao-de-teca-pelo-brasil-afora/>>
- COSTA, E. A. **Modelo não linear misto para descrever o afilamento do tronco de *Araucaria angustifolia* no sul do Brasil**. 2014. Monografia (Especialização em estatística e modelagem quantitativa) – Programa de pós-graduação em modelagem quantitativa, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, 2014.
- COSTA, E. A.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R.; HESS, A. F. Função de afilamento e sortimentos de madeira para *Araucaria angustifolia*. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, abr.-jun., 2016.
- COSTA, R. B. da; RESENDE, M. D. V. de; SILVA, V. S. de M. e. Experimentação e seleção no melhoramento genético de teca (*Tectona grandis* L.f.). **Floresta e Ambiente**, v. 14, n. 1, p. 76–92, 2007.
- COUTINHO, S.A. Cultivo e mercado da Teca. **Revista Opiniões**, v.5, n.18, 2018. Disponível em: < <http://florestal.revistaopinioes.com.br/revista/detalhes/18-cultivo-e-mercado-da-teca/>>
- CRUZ, J. P. **Crescimento e produção de *Tectona grandis* na região de Tangará da Serra - Mato Grosso**. 57f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

DAVIDIAN, M.; GILTINAN, D.M. **Nonlinear models for repeated measurement data**. London: Chapman & Hall, 1995. 359 p

DEMAERSCHALK J. P. Converting volume equations to compatible taper equations. **Forest Science**, Washington, v.18, n.3, p.:241–245, 1972.

DEMAERSCHALK J. P. Integrated systems for the estimation of tree taper and volume. **Can. J. of For. Res.**, Ottawa, v.3, n.1, p: 90–94, 1973.

DEMAERSCHALK, J. P.; KOZAK, A. The whole-bole system: a conditional dual-equation system for precise prediction of tree profiles. **Can. J. of For. Res.**, Ottawa, v.7, n.3, p.488-497, 1977.

de-MIGUEL, S.; MEHTÄTALO, L.; SHATER, Z.; KRAID, B.; PUKKALA, T. Evaluating marginal and conditional predictions of taper models in the absence of calibration data. **Can. J. For. Res.**, v. 42, p. 1383–1394, 2012. doi:10.1139/X2012-090

DRESCHER, R.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R. 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.

DUARTE, J.B.; VENCOVSKY, R. Estimacão e predico por modelo linear misto com ênfase na ordenaco de médias de tratamentos genéticos. **Scientia Agricola**, v.58, n.1, p.109-117, jan./mar. 2001.

EISFELD, R. L.; MELLO A. A.; SNAQUETTA, C. R.; WEBER, K. S. Avaliaco de modelos polinomiais na estimativa de volume total e por sortimento de *Pinus taeda*. **Brasil Florestal**, v.1, n.79, p.9-15, 2004.

ENTERS, T. Site, technology and productivity of teak plantations in Southeast Asia. **Unasyiva**, v. 51, n. 201, p. 55–61, 2000.

FANG, Z.; BAILEY, R. L. Nonlinear mixed effects modeling for slash pine dominant height growth following intensive silvicultural treatments. *Forest Science*, v. 47, n. 3, 2001.

FANG, Z.; BORDERS, B. E.; BAILEY, R. L. Tree volume and upper-stem diameter predictions for planted loblolly and slash pine based on a compatible volume-taper system with segmented-stem form factors. **PMRC Technical Report**, 1999-3, 20p., 1999.

FAUSTO, M. A. et al. O modelo de regressão linear misto para dados longitudinais: uma aplicaco na análise de dados antropométricos desbalanceados. **Cadernos de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 3, p.513-524, mar. 2009.

FAVALESSA, C. M. C.; UBIALLI, J. A.; CALDEIRA, S. F.; DRESCHER, R. Funoes de afilamento não segmentadas e segmentadas para *Tectona grandis* na região centro-sul matogrossense. **Pesq. flor. bras.**, Colombo, v. 32, n. 72, p. 373-387, out./dez. 2012a. doi: 10.4336/2012.pfb.32.72.373.

FAVALESSA, C. M. C.; UBIALLI, J. A.; CALDEIRA, S. F.; DRESCHER, R.; ACOSTA, F. C. Equacoes de sortimentos para *Tectona grandis* na região centro – sul de Mato Grosso. **Pesq. flor. bras.**, Colombo, v. 32, n. 72, p. 389-399, out./dez. 2012b. doi: 10.4336/2012.pfb.32.72.389.

- FAVALESSA, C.M. **Modelagem da distribuição de diâmetros e estruturação da produção para *Tectona grandis* Linn. f. em Mato Grosso**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. [2018].
- FERREIRA, S. O. **Estudo da forma do fuste de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus cloeziana***. 1999, 132p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. 1999.
- FIGUEIREDO FILHO, A. **Influência da resinagem no crescimento de *Pinus elliottii* Engelm. var. *elliottii* e sua avaliação econômica**. 155f. Tese (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1991.
- FIGUEIREDO FILHO, A.; BORDERS, B. E.; HITCH, K. L. Taper equations for *Pinus taeda* in Southern Brazil. **For. Ecol. and Manag.**, Amsterdã, v.83, n.1, p. 39-46, 1996.
- FIGUEIREDO FILHO, A.; KOHLER, S.V.; FELDE, J.L.; DIAS, A.N. Dinâmica do afilamento do tronco e da produção de madeira em plantios de *Araucaria angustifolia*. **Cerne**, v.20, n.4, p.595-603, 2014. doi: 10.1590/01047760201420041386
- FIGUEIREDO FILHO, A.; RETSLAFF, F. A. S.; KOHLER, S. V.; BECKER, M.; BRANDES, D. Efeito da Idade no Afilamento e Sortimento em Povoamentos de *Araucaria angustifolia*. **Floresta Ambient.** vol.22 no.1 Seropédica Jan./Mar. 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.080114>
- FIGUEIREDO, E. O. **Avaliação de povoamentos de teca (*Tectona grandis* L.f.) na microrregião do Baixo Rio Acre**. 2005. 301p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.
- FIGUEIREDO, E. O. **Avaliação do crescimento da teca (*Tectona grandis* L.F.) para análise de tronco**. Rio Branco: Embrapa Acre, 2001. 4 p. (Embrapa Acre. Instruções Técnicas, 35).
- FIGUEIREDO, E. O.; SCOLFORO, J. R. S.; OLIVEIRA, A. D. de. Seleção de modelos polinomiais para representar o perfil e volume do fuste de *Tectona grandis* L.f. **Acta Amazonica**, v. 36, n. 4, p. 465 – 482, 2006.
- FINGER, C. A. G. **Fundamentos da biometria florestal**. Santa Maria: UFSM/CEPEF/FATEC; 1992. 269 p.
- FINGER, C. A. G.; ZANON, M. L. B.; SCHNEIDER, P. R.; KLEIN, J. E. M.; COELHO, M. C. B. Funções de forma para *Eucalyptus dunnii* Maiden implantados na depressão central e encosta do sudeste do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.25, n.3, p.399-403, 1995.
- FISCHER, F. **Eficiência dos modelos polinomiais e das razões de volume na estimativa volumétrica dos sortimentos e do perfil do fuste de *Pinus taeda***. 1997. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG.
- FLOUDAS, C. A.; LIN, X. Mixed interger linear programming in process scheduling: modeling, algorithms and applications. **Annals of Operations Research**, v. 139, p. 131-162, 2005.

FORSLUND, R. R. A geometrical tree volume model based on the location of the centre of gravity of the bole. **Can. J. of For. Res.**, Ottawa, v.12, n.2, p.215-221, 1982.

FORSLUND, R. R. The power function as a simple stem profile examination tool. **Can. J. of For. Res.**, Ottawa, v.21, n.2, p.193–198, 1991.

FRIEDL, R. A. **Dinâmica e prognose na forma dos fustes em povoamentos plantados de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze.** 167f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1989.

FRIES, J. Eigenvalue analyses show that birch and pine have similar form in Sweden and British Columbia. *Forestry Chronicle*, Mattawa, 41, v.1, p.135-139, 1965.

FULLER, W.A. Grafted polynomials as approximating functions. *Australian Journal of Agricultural Economics*, Canberra, v. 13, n.1, p.35-46, 1969.

GALLANT, A. R. The theory of nonlinear regression as it relates to segmented polynomial regressions with estimated join points. **Mimeograph Series**, No. 925, Institute of Statistics, Raleigh, N.C., 25 p., 1974.

GALLANT, A. R.; FULLER, W. A. Fitting segmented polynomial regression models whose join points have to be estimated. **Journal of the American Statistical Association**, Albuquerque, v.68, n.341, p.144-147, 1973.

GEVORKIANTZ, S. R.; OLSEN, L.P. Composite volume tables for timber and their application in the Lake States. **Technical Bulletin**, nº 1104, U. S. Department of Agriculture, 51p., 1955.

GILL, J.; KING, G. What to Do When Your Hessian Is Not Invertible Alternatives to Model Respecification in Nonlinear Estimation. **Sociological Methods & Research**, v. 33, n. 1, p.54-87, aug 2004. DOI: 10.1177/0049124103262681

GNU OCTAVE. EATON, J.W.; BATEMAN, D.; HAUBERG, S.; WEHBRING, R.. **GNU Octave version 4.2.0** manual: a high-level interactive language for numerical computations. 2016. Disponível em: <<http://www.gnu.org/software/octave/doc/interpreter/>>

GOMES, A.M.A. **Medição dos arvoredos.** Lisboa: Livraria Sá da Costa, 1957. 413p.

GOMES, I. M. da S.; SANTOS JUNIOR, W. R. dos; ARRUDA, A. da S. Análise de soluções para extração de corante de folhas da teca em diferentes estágios de desenvolvimento. **Enciclopédia Biosfera**, v. 7, n. 12, p. 1–18, 2011.

GOMES, J. E. **Desenvolvimento inicial de *Tectona grandis* L.f. (Teca) em área de cerrado sobre diferentes espaçamentos.** 2002. 76 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2002.

GORDON, A. Comparison of compatible polynomial taper equations. **New Zealand Journal of Forestry Science**, Rotorua, v. 13, n. 2, p. 146-155, 1983.

GOULDING, C. J.; MURRAY, J. C. Polynomial taper equations that are compatible with tree volume equations. *New Zealand Journal of Forestry Science*, Tiergartenstr, v.5, n.3, p.313–322, 1976.

GRAY, H. R. The form and taper of forest-tree stems. Institute Paper nº 32, **Imperial Forestry Institute**, University of Oxford, Oxford, 80p, 1956.

GREGERSEN, H.; CONTRERAS, A. **Análisis económico de proyectos forestales**. FAO Montes. Roma. 1980.

GREGOIRE, T. G.; SCHABENBERGER, O. A non-linear mixed-effects model to predict cumulative bole volume of standing trees. **Journal of Applied Statistics**, v.23, n.2-3, p.257-272, 1996.

GROSENBAUGH, L. R. 1966: "Tree form: definition, interpolation, extrapolation. **Forestry Chronicle**, 42 (4): 444-57.

HÄRDTL, H. Die formbildende Wirkung der Eigenlast von Stamm und Zweigen bei einem Nadelbaum. **Forstwiss. Centr**, Alemanha, v.60, p. 424-429, 1938.

HENDERSON, C.R. **Applications of Linear Models in Animal Breeding**. University of Guelph: Canada. 1984. 462p.

HONER, T. G. A new total cubic foot volume function. **Forestry Chronicle**, Mattawa, v.41, n.4, p.476-493, 1965.

<http://www.painelflorestal.com.br/noticias/silvicultura/mato-grosso-lidera-producao-de-teca-no-pais>

HUSCH, B.; BEERS, T. W.; KERSHAW JR., J. A. **Forest mensuration**. 4.ed, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 443p., 2003.

HUSCH, B; MILLER, C.L.; BEERS, T.E. **Forest mensuration**. 2. ed. New York: Ronald Press, 1972. 410p.

ITTO. The ITTO Tropical Timber Market (TTM) Report. **ITTO TTM Report**: v.22, n.10, p.16-31, May, 2018.

JIANG, L.; BROOKS, J.R.; WANG, J. Compatible taper and volume equations for yellow-poplar in West Virginia. **For. Ecol. and Manag.**, 213, p.399–409, 2005.

KIRCHNER, F. F.; FIGUEIREDO FILHO, A.; SCOLFORO, J. R. S.; MACHADO, S. A.; MITISHITA, E. A. O uso de funções spline no cálculo de volume de árvores. **Floresta**, v. 19, n. 1, p. 116-122, 1989.

KOHLER, S. V.; KOHLER, H. S.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARCE, J. E.; MACHADO, S. A. Evolução do sortimento em povoamentos de *Pinus taeda* nos estados do Paraná e Santa Catarina. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 45, n. 3, p. 545 - 554, jul. / set. 2015. DOI: 10.5380/ufv.v45i3.35746

KOSLOWSKI, T. T. **Growth and development of trees**. Madison, Wisconsin: University of Wisconsin, v. 2., 1971.

KOTZÉ, J. J. The management of pine stands for pulpwood. **J. So. African For. Assoc.**, v. 35, n.1, p. 3-9. 1960. doi: 10.1080/03759873.1960.9630919

KOZAK, A. A variable exponent taper equation. **Can. J. of For. Res.**, Ottawa, v. 18, n. 11, p. 1363-1368, 1988.

KOZAK, A. Effects of multicollinearity and autocorrelation on the variable-exponent taper functions. **Can. J. of For. Res.**, Ottawa, v. 27, n. 5, p. 619-629, 1997.

KOZAK, A. My last words on taper equations. **Forestry Chronicle**, Mattawa, v. 80, n. 4, p. 507-515, 2004.

KOZAK, A.; MUNRO D. D.; SMITH J. H G. Taper functions and their application in forest inventory. **Forestry Chronicle**, Ottawa, v.45, n.4, p.278-283, 1969.

KRISHNAPILLAY, B. Silviculture and management of teak plantations. **Unasyuva**, v. 51, n. 201, p. 14–21, 2000.

KUBLIN, E.; AUGUSTIN, N. H.; LAPPI, J. A flexible regression model for diameter prediction. **Eur J Forest Res**, 127:415–428. (2008).

KUBLIN, E.; BREIDENBACH, J.; KÄNDLER, G. A flexible stem taper and volume prediction method based on mixed-effects B-spline regression. **Eur J Forest Res**, 132:983–997. 2013. DOI 10.1007/s10342-013-0715-0

KUTNER, M. H.; NACHTSHEIM, C. J.; NETTER, J.; LI, W. **Applied Linear Statistical Models**, 5.ed. Boston: McGraw-Hill Irwin, 2004. 1396p.

LACHTERMACHER, G. **Pesquisa operacional na tomada de decisões**. Elsevier: Rio de Janeiro, RJ. 2007.

LADRACH, W. **Management of teak plantations for solid wood products**. Bethesda: ISTF, 2009. 25 p.

LAMPRECHT, H. **Silvicultura nos trópicos: ecossistemas florestais e respectivas espécies arbóreas, possibilidades e métodos de aproveitamento sustentado**. Eschborn: GTZ, 1990. 343p.

LARSON, P.R. Stem form development of forest trees. **Forest Science** (Monograph), Washington, p.1-41, 1963.

LEE, W. K.; SEO, J. H.; SON, Y. M.; LEE, K. H.; von GADOW, K. Modeling stem profiles for *Pinus densiflora* in Korea. **For. Ecol. and Manag.**, Amsterdã, v. 172, n. 1, p. 69-77, 2003.

LEITE, H. G. **Conversão de fustes em multiprodutos de madeira, utilizando programação dinâmica**. 1994. 230 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1994.

LEITE, H. G.; GAMA, J. R. V.; CRUZ, J. P.; SOUZA, A. L. Função de afilamento para *Virola surinamensis* (Rool.) Warb. **Revista Árvore**, Viçosa, v.30, n.1, p.99-106, 2006.

LEITES, L.P.; ROBINSON, A.P. Improving taper equations of Loblolly Pine with crown dimensions in a mixed-effects modeling framework. **Forest Science**, Washington, v.50, n.2, p.204–212, 2004.

LEJEUNE, G.; UNG, C.H.; FORTIN, M.; GUO, X.J.; LAMBERT, M.C., and RUEL, J.C. A simple stem taper model with mixed effects for boreal black spruce. **European Journal of Forest Research**, Dordrecht, v.128, n.5, p.505–513, 2009.

- LEUSCHNER, W. A. **Introduction to forest resource management**. New York: John Wiley and Sons, 1984. 304 p.
- LINDSTROM, M. J.; BATES, D. M. Nonlinear mixed effects models for repeated measures data. **Biometrics**, Washington, v. 46, n. 3, p. 673-687, Sept. 1990.
- LIU, C. J. Log volume estimation with spline approximation. **Forest Science**, Washington, v.26, n.3, p.361-369, 1980.
- LIU, C. J.; KEISTER, T. D. Southern pine stem form defined through principal component analysis. **Can. J. of For. Res.**, Ottawa, v.8, n.2, p.188-197, 1978.
- LOETSCH, F.; ZOHRER, F.; HALLER, K.E. **Forest Inventory**, v. 2. München: BLV, 1973. 469p.
- LORENZI, H.; SOUZA, H. M.; TORRES, M. A. V. **Árvores exóticas no Brasil: madeireiras, ornamentais e aromáticas**. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2003. 384p.
- MACHADO, A. L. F. **Métodos usuais e propostos para expressar perfis dendrométricos e determinar volumes individuais**. 189f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- MACHADO, S. do A. Influência da idade na forma do fuste de *Araucaria angustifolia* em plantações no Brasil. In: SEMINÁRIO SOBRE ATUALIDADES E PERSPECTIVAS FLORESTAIS: O uso de funções de forma de tronco em estudo de volumetria de espécies florestais, 5, Curitiba, 1982. **Anais...** Curitiba: EMBRAPA. 1982, p. 51–55 (Documento 9).
- MARTIN, J.A. Taper and volume equations for selected Appalachian hardwoodspecies. **Res. Pap. NE—490**. USDA For. Serv., 22 p, 1981.
- MARTIN, J.A. Testing volume equation accuracy with water displacement techniques. **Forest Science**, Washington, v.30, n.1, p. 41-50, 1984.
- MATTE, L. The taper of coniferous species with special reference to Loblolly Pine. **Forestry Chronicle**, Mattawa, v.25, n.1, p.21-31, 1949.
- MAX, T. A.; BURKHART, H. E. Segmented polynomial regression applied to taper equations. **Forest Science**, Washington, v.22, n.3, p.283-289, 1976.
- McCULLOCH, C. E.; SEARLE, S. R. **Generalized, linear and mixed models**. 1ed. John Wiley and Sons: New York, 2001.
- MENDONÇA, A. R.; SILVA, G. F.; OLIVEIRA, J. T.; NOGUEIRA, G. S.; ASSIS, A. L. Avaliação de funções de afilamento visando a otimização de fustes de *Eucalyptus* sp. para multiprodutos. **Cerne**, Lavras, v.13, n.1, p.71-82, 2007.
- MENG, S. X.; HUANG, S. Improving calibration of nonlinear mixed-effects models demonstrated on a height growth function. **Forest Science**, v. 55, n. 3, p. 238-248, 2009.
- MIRGHANI, B. Y.; TRYBY, M. E.; BAESSLER, D. A.; KARONIS, N.; RANJITHAN, R. S.; MAHINTHAKUMAR, K. G. Development and Performance Analysis of a Simulation-Optimization Framework on TeraGrid Linux Clusters. **Proceedings of the 6th LCI International Conference on Linux**, 2005.

MONSERUD, R.A.; STERBA, H. A basal area increment model for individual trees growing in even-and-uneven-aged forest stands in Austria. **Forest Ecology and management**, v. 80, p. 57-80, 1996.

MORA, F.; HERNÁNDEZ, W. Estimación del volumen comercial por producto para rodales de teca en el pacífico de Costa Rica. **Agronomía Costarricense**, v. 31, n. 1, p. 101–112, 2007.

MÔRA, R. **Funções de afilamento de forma variável e modelagem de efeitos mistos em fustes de *Pinus taeda* e *Eucalyptus saligna***. 2015. 277f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2015.

MÔRA, R.; SILVA, G. F.; GONÇALVES, F. G.; SOARES, C. P. B.; CHICHORRO, J. F.; CURTO, R. A. Análise de diferentes formas de ajuste de funções de afilamento. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.42, n.102, p.237-249, 2014.

MUHAIRWE, C. K. **Examination and modelling of tree form and taper over time for interior Lodgepole Pine**. 192 f. Thesis (Doctor of Philosophy in The Faculty of Graduate studies Forest Resources Management) - University of British Columbia, British, 1993.

MUHAIRWE, C. K. Taper equations for *Eucalyptus pilularis* and *Eucalyptus grandis* for the north coast in New South Wales, Australia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdã, v. 113, n. 2-3, p. 251-269, 1999.

MÜLLER, I. **Forma de tronco e sortimentos de madeira para *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden., manejado em alto fuste, na região sudeste do estado do Rio Grande do Sul**. 166f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

MÜLLER, I.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R. Forma de tronco e sortimentos de madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, na região sudeste do estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.15, n.3, p.293-305, 2005.

MÜLLER, M. D.; SALLES, T. T.; PACIULLO, D. S.; BRIGHENTI, A. M.; CASTRO, C. R. T. Equações de altura, volume e afilamento para eucalipto e acácia estabelecidos em sistema silvipastoril. **Floresta**, Curitiba, v.44, n.3, p.473-484, 2014.

NEWBERRY, J.; BURKHART, H. E. Variable form stem profile models for Loblolly Pine. **Can. J. of For. Res.**, Ottawa, v.16, n.1, p.109–114, 1986.

NEWNHAM, R. M. A variable-form taper function. **Can. For. Serv.** Petawawa Natl. For. Inst. Inf. Rep. PI-X-83., 31 p.,1988.

NEWNHAM, R. M. Variable-form taper functions for four Alberta tree species. **Can. J. of For. Res.**, Ottawa, v. 22, n. 2, p. 210-223, 1992.

NICOLETTI, M. F. **Modelagem não linear mista e método bivariado para sortimento da produção de *Pinus taeda* L.** 2017. Tese (Doutorado em engenharia florestal) – Programa de pós-graduação em engenharia florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2017.

- NOVAK, R. S. **Um Sistema de otimização aplicada ao desdobro de madeira**. 2007. 140p. Dissertação (Mestrado em Métodos numéricos em Engenharia dos Setores de Tecnologia e Ciências Exatas) – Universidade Federal de Paraná, Curitiba, PR, 2007.
- OLIVEIRA, L.C.; ANGELI, A.; STAPE, J.L. **Revista da Madeira**, n.106, jul, 2007. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1114> Acesso em: 27 jul. 2018.
- ORMEROD, D. W. A simple bole model. **Forestry Chronicle**, Ottawa, v.49, n.3, p.136–138, 1973.
- ORMEROD, D. W. The diameter-point method for tree taper description. **Can. J. of For. Res.**, Ottawa, v.16, n.3, p.484-490, 1986.
- ÖZÇELİK, R.; BROOKS, J. R.; JIANG, L. Modeling stem profile of Lebanon cedar, Brutian pine, and Cilicica fir in Southern Turkey using nonlinear mixed-effects models. **European Journal of Forest Research**, Dordrecht, v.130, n.4, p.613–621, 2011.
- PANDEY, D.; BROWN, C. Teak: a global overview. **Unasyuva**, v. 51, n. 1, p. 3-13, 2000.
- PARRESOL, B. R.; HOTVEDT, J. E.; CAO, Q. V. A volume and taper prediction system for bald cypress. **Can. J. of For. Res.**, Ottawa, v.17, n.3, p.250-259, 1987.
- PÉLLICO NETTO, S.; BRENA, D. **Inventário florestal**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1997, 316p.
- PEREIRA, C. D.; CUNHA, G. F. da.; SILVA, M. G. da. A simulação na pesquisa operacional: uma revisão literária. **Anais.. Encontro de Engenharia de Produção Agroindustrial**, IX, Paraná, 2015.
- PEREZ, D. N.; BURKHART, H. E.; STIFF, C. T. A variable-form taper function for *Pinus oocarpa* Schiede in Central Honduras. **Forest Science**, Washington, v. 36, n. 1, p. 186-191, 1990.
- PIASSI, L.C. **Métodos de regulação florestal no planejamento da produção de madeira**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias, Jerônimo Monteiro, ES. 2011.
- PINHEIRO, C.J.; BATES, D.M. **Mixed-effects models in S and S-PLUS**. New York: Springer-Verlag, 2000. 528p.
- PINHEIRO, J. C. **Topics in mixed effects models**. 1994. Thesis (Doctor of Philosophy – Statistics) – University of Wisconsin, Madison, 1994.
- PONNUSAMI, V.; SRIVASTAVA, S. N.; Studies on application of teak leaf powders for the removal of color from syntethic and industrial effluents. **Journal of Hazardous Matariasl**, Pohang, V. 169, p.1159-1162, 2009.
- PRODAN, M. PETERS, R. COX, F. **Mensura florestal**. San José, Costa Rica: IICA, 1997. 586p.
- QUEIROZ, D. **Avaliação de função de afilamento e sortimentos para *Mimosa scabrella* Bentham em povoamentos nativos da região metropolitana de**

Curitiba/PR. 134f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

REED, D.D.; BYRNE, J. C. A simple, variable form volume estimation system. **Forestry Chronicle**, Mattawa, v.61, n.2, p.87-90, 1985.

RODRIGUES, F.L.; SILVA, G.F.; 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. **R. Árvore**, Viçosa-MG, v.30, n.5, p.769-778, 2006.

ROJO, A.; PERALES, X.; SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, F.; GONZÁLEZ-ALVAREZ J. G.; Von GADOW, K. Stem taper functions for maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Galicia (Northwestern Spain). **European Journal of Forest Research**, Dordrecht, v.124, n.3, p.177-186, 2005.

RONDON NETO, R. M.; MACEDO, R. L. G.; TSUKAMOTO FILHO, A. A. Formação de povoamentos florestais com *Tectona grandis* L.f (teca). **Boletim Técnico – Série Extensão**, Lavras, v.7, n.33, p.1-29, 1998.

SANTOS, R. M.N.; TEIXEIRA, M. L. F.; PEREIRA M.B. MENEZES, E.B. Potential insecticidal effects of aqueous tree leaf extracts against the subterranean *termite coptoterms* (Isoptra: Rhinotermitidae). **Sociobiology**, California, v.53, n.3, p.719-728, 2009.

SCHABENBERGER, O.; PIERCE, F. J. **Contemporary statistical models for the plant and soil sciences**. 1ed. CRC Press LLC: Florida. 2002.

SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G.; KLEIN, J. E. M.; TOTTI, J. A.; BAZZO, J. L. Forma do tronco e sortimentos de madeira de *Eucalyptus grandis* Maiden para o estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.6, n.1, p.79-88, 1996.

SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, P. S. P.; SOUZA, C. A. M. **Análise de regressão aplicada à engenharia florestal**. Santa Maria, FACOS-UFSM, 2009. 294p.

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

SCHUHLI, G. S.; PALUDZYSZYN FILHO, E. O cenário da silvicultura de teca e perspectivas para o melhoramento genético. **Pes. Flor. Brasileira**, v. 30, n. 63, p. 217–230, 2010.

SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **J.I of Agricultural Research**, Washington, v.47, n.9, p.719-734, 1933.

SCOLFORO, J. R. S.; RIOS, M. S.; OLIVEIRA, A. D.; MELLO, J. M.; MAESTRI, R. Acuracidade de equações de afilamento para representar o perfil do fuste de *Pinus elliotii*. **Cerne**, Lavras, v.4, n.1, p.100-122, 1998.

SCOLFORO, J.R.S.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Biometria florestal**: medição e volumetria de árvores. Lavras: Universidade Federal de Lavras / Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão. 1998. 310p

SHARMA, M.; ODERWALD, R. G. Dimensionally compatible volume and taper equations. **Can. J. of For. Res.**, Ottawa, v.31, n.5, p.797-803, 2001.

- SHARMA, M.; PARTON, J. Modeling stand density effects on taper for jack pine and black spruce plantations using dimensional analysis. **Forest Science**, v. 55, n. 3, p. 268-282, 2009.
- SHARMA, M.; ZHANG, S.Y. Variable-exponent taper equations for jack pine, black spruce, and balsam fir in eastern Canada. **For. Ecol. and Manag.**, Amsterdã, v. 198, n.1-3, p.39–53, 2004.
- SHIMIZU, J.Y.; KLEIN, H; OLIVEIRA, J.R.V. **Diagnóstico das plantações florestais em Mato Grosso**. Cuiabá, MT: Central de Texto, 2007. 63p.
- SILVA, J.A. **Seleção de parcelas amostrais aplicadas em povoamentos de *Pinus taeda* L. para fins biométricos em Santa Maria - RS**. 1974. 87p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Rural) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1974.
- SINHA, S. K.; DEEPAK, M. S.; RAO, R. V.; BORGAONKAR, H. P. Dendroclimatic analysis of teak (*Tectona grandis* L. f.) annual rings from two locations of peninsular India. **Current Science**, v. 100, n. 1, p. 84–88, 2011.
- SIQUEIRA, T.A.S. **Serapilheira e a regeneração por alto fuste após a colheita de povoamento de teca**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT. 2017
- SMITH, D. M.; LARSON, B. C.; KELTY, M. J.; ASHTON, P. K. S. **The Practice of Silviculture Applied Forest Ecology**. New York. John Wiley & Sons, 1997. 537p.
- SOARES, T. S. **Otimização do uso da madeira em povoamentos de eucalipto**. 60f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.
- SOUZA, C. A. M. **Avaliação de modelos de taper não segmentados e segmentados na estimação de altura e volume comercial de fustes de *Eucalyptus* sp.** 107f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2007.
- SOUZA, C. A. M. **Modelos de afilamento para *Pinus taeda* L. ajustados segundo a forma do tronco e métodos de estratificação**. 120f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.
- SOUZA, C. A. M.; CHASSOT, T.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R.; FLEIG, F. D. Modelos de afilamento para o sortimento do fuste de *Pinus taeda* L. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, n.9, p.2506-2511, 2008a.
- SOUZA, C. A. M.; SILVA, G. F.; XAVIER, A. C.; CHICHORRO, J. F.; SOARES, C. P. B.; SOUZA, A. L. Avaliação de modelos de afilamento segmentados na estimação da altura e volume comercial de fustes de *Eucalyptus* sp. **Revista Árvore**, Viçosa, v.32, n.3, p.453-463, 2008b.
- SOUZA, E.A.B. **Uso da programação linear como suporte de decisão para regimes de manejo de teca (*Tectona grandis* L. f.)**. 2017. Monografia (Trabalho de conclusão de curso para obtenção do título de Engenheiro Florestal) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Dois Vizinhos, PR. 2017.
- SPURR, S. H. **Forest inventory**. Ronald Press Co., N.Y., 1952.

- STERBA, H. Stem curves: a review of the literature. **Forestry Abstracts**, v.41, n.4, p.141-145, 1980.
- STOATE, T. N. Taper in *Pinus pinaster*. **Australian For.**, v. 6, n. 2, p 59-66, 1941. doi: 10.1080/00049158.1941.10675726
- TANAKA, N.; HAMAZAKI, T.; VACHARANGKURA, T. Distribution, Growth and site requirements of teak. **Japan Agricultural Research Quarterly**, v. 32, p. 65–77, 1998.
- TASSISSA, G.; BURKHART, H. E. An application of mixed effects analysis to modeling thinning effects on stem profile of loblolly pine. **For. Ecol. and Manag.**, v. 103, p. 87-101, 1998.
- TEMPONI, E. C. C. **Uma proposta de resolução do problema de corte bidimensional via abordagem metaheurística**. 2007. 80p. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional) – Centro Federal de Educação Tecnológica em Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
- THOMAS, C. E.; PARRESOL, B. R. Simple, flexible, trigonometric taper equations. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v.21, n.7, p.1132-1137, 1991.
- THULASIDAS, P. K.; BHAT, K. M. Chemical extractive compounds determining the brown-rot decay resistance of teakwood. **Holz Roh Werkst**, Berlin, v. 65, p. 121-124, 2007.
- TONINI, H.; COSTA, M. C. G. C.; SCHWENGBER, L. A. M. Crescimento da teca (*Tectona grandis*) em reflorestamento na Amazônia Setentrional. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n. 59, p. 05–14, 2009.
- TRINCADO, G.; BURKHART, H. E. A generalized approach for modeling and localizing stem profiles curves. **Forest Science**, Washington, v.52, n.6, p.670–682, 2006.
- TRINCADO, G.; VANDERSCHAAF, C. L.; BURKHART, H. E. Regional mixed-effects height–diameter models for loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantations. **Eur J Forest Res**, v. 126, p. 253–262, 2007. doi: 10.1007/s10342-006-0141-7
- TROREY, L. G. A mathematical method for the construction of diameter height curves based on site. **The Forestry Chronicle**, v. 8, p. 121–132, 1932.
- UGALDE, L.; PÉREZ, O. **Mean annual volume increment on selected industrial forest**, FAO, working paper FP/1. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-ac121e.pdf> Acesso em: 27 jul 2018.
- VALENTINE, H. T.; GREGOIRE, T. G. A switching model of bole taper. **Can. J. For. Res.**, Ottawa, v. 31, p. 1400–1409, 2001. doi: 10.1139/cjfr-31-8-1400
- VONESH, E.F.; CHINCHILLI, V.M. **Linear and Nonlinear Models for the Analysis of Repeated Measurements**. Marcel Dekker, Inc.: New York, 1997. 560p.
- VYAS, P.; YADAV, D.K.; KHANDELWAL, P. *Tectona grandis* (teak) - A review on its phytochemical and therapeutic potential. **Natural Product Research**, Published Online: 06 Mar 2018, 2018. doi: 10.1080/14786419.2018.1440217.
- WALTERS, D.K.; HANN, D. W. Taper equations for six conifer species in Southwest Oregon. **Research Bulletin**, No. 56, Oreg. State Univ. For. Res. Lab. 42 p., 1986.

WEAVER, P. L. *Tectona grandis* L.f. **Teak**. New Orleans, LA: US. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station, 18p. 1993.

WEISS, R.E. **Modeling longitudinal data**. New York: Springer, 2005. 572 p.

WEST, P. W.; RATKOWSKY, D. A.; DAVIS, A. W. Problems of hypothesis testing of regressions with multiple measurements from individual sampling units. **For. Ecol. and Manag.**, v. 7, p. 207-224, 1984.

WOLFRAM ALPHA LLC. 2018. **Wolfram|Alpha**. Disponível em: <<http://www.wolframalpha.com/input/?i=2%2B2>>. Acesso em: jan, 2018.

YANG, Y.; HUANG, S.; TRINCADO, G.; MENG, S.X. Nonlinear mixed-effects modelling of variable-exponent taper equations for lodgepole pine in Alberta, Canada. **Eur. J. of For. Res.**, Dordrecht, v.128, n.4, p.415–429, 2009.

APÊNDICE A – CALIBRAÇÃO DOS EFEITOS ALEATÓRIOS DA EQUAÇÃO DE CLARK III ET AL. (1991) COM EFEITO MISTO PARA UMA ÁRVORE DE *Tectona grandis* L. F. PROVENIENTE REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO

A *proc nlmixed* no SAS foi utilizada para estimar os parâmetros de efeitos fixos β_k e os parâmetros variância-covariância associados aos parâmetros de efeitos aleatórios μ_k para cada árvore j no modelo de Clark III et al. (1991).

Parâmetros estimados e erros padrões para a equação de Clark III et al. (1991) com efeito misto para *Tectona grandis* L.f., região centro-sul do estado de Mato Grosso

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	P-valor
β_0	42,0739	1,6153	<0,0001
β_1	8,5873	0,3926	<0,0001
β_2	0,9058	0,03910	<0,0001
β_3	929,09	241,91	0,0002
β_4	0,6939	0,007898	<0,0001
β_5	1,8575	0,04334	<0,0001
$\sigma_{\mu_1}^2$	0,1092	0,01505	<0,0001
$\sigma_{\mu_1\mu_2}$	0,02391	0,01375	0,0841
$\sigma_{\mu_2}^2$	0,1902	0,02638	<0,0001
σ^2	0,9145	0,02579	<0,0001

As calibrações de d_{ij} específicos das árvores da equação de afilamento de efeitos mistos não-lineares foi baseado na previsão do vetor de parâmetros de efeitos aleatórios (μ_{kj}) proposta por Vonesh e Chinchilli (1997) e Trincado e Burkhart (2006).

$$\hat{\mu}_j = \hat{D}Z_i^T(Z_i\hat{D}Z_i^T + \hat{R}_i)^{-1}res_{ij}$$

\hat{D} é a matriz estimada de variância-covariância para os parâmetros de efeitos aleatórios μ_i para a árvore j , essa matriz é constante para todas as árvores.

$$\hat{D} = \begin{vmatrix} \sigma_{\mu_1}^2 & \sigma_{\mu_1\mu_2} \\ \sigma_{\mu_1\mu_2} & \sigma_{\mu_2}^2 \end{vmatrix} \therefore \hat{D} = \begin{vmatrix} 0,1092 & 0,02391 \\ 0,02391 & 0,1902 \end{vmatrix}$$

em que: $\sigma_{\mu_1}^2$ – variância do efeito aleatório μ_1 ; $\sigma_{\mu_1\mu_2}$ – covariância entre os efeitos aleatórios μ_1 e μ_2 ; $\sigma_{\mu_2}^2$ – variância do efeito aleatório μ_2 .

Z_j é a matriz de derivadas parciais em relação aos parâmetros de efeitos aleatórios μ_{kj} . Para os coeficientes fixos β_2 e β_5 , combinados com cada efeito μ_{kj} , será aplicada uma derivada parcial $Z_{h_i\beta_{kj}}$

$$Z_{h_i\beta_{2j}} = \frac{0,5d_j^2 \left(\left(1 - \frac{h_i}{h_j}\right)^{\beta_0} - \left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_0} \right)}{\left(\left(d_j^2 \left(1 + \frac{\left(\beta_2 + \frac{\beta_3}{d_j^3}\right) \left(\left(1 - \frac{h_i}{h_j}\right)^{\beta_0} - \left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_0} \right)}{1 - \left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_0}} \right) + d_j^2 - \frac{(d_j^2 - d_{5,3j}^2) \left(\left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_1} - \left(1 - \frac{h_i}{h_j}\right)^{\beta_1} \right)}{\left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_1} - \left(1 - \frac{5,3}{h_j}\right)^{\beta_1}} + d_{5,3j}^2 \left(\beta_5 \left(\frac{h_i - 5,3}{h_j - 5,3} - 1 \right)^2 + \frac{(1 - \beta_5) \left(\beta_4 - \frac{h_i - 5,3}{h_j - 5,3} \right)^2}{\beta_4^2} \right) \right)^{0,5}} \left(1 - \left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_0} \right)$$

$$Z_{h_i\beta_{5j}} = \frac{\left(0,5d_{5,3j}^2 \left(\left(\frac{h_i - 5,3}{h_j - 5,3} - 1 \right)^2 - \frac{\left(\beta_4 - \frac{h_i - 5,3}{h_j - 5,3} \right)^2}{\beta_4^2} \right) \right)}{\left(\left(d_j^2 \left(1 + \frac{\left(\beta_2 + \frac{\beta_3}{d_j^3}\right) \left(\left(1 - \frac{h_i}{h_j}\right)^{\beta_0} - \left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_0} \right)}{1 - \left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_0}} \right) + d_j^2 - \frac{(d_j^2 - d_{5,3j}^2) \left(\left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_1} - \left(1 - \frac{h_i}{h_j}\right)^{\beta_1} \right)}{\left(1 - \frac{1,3}{h_j}\right)^{\beta_1} - \left(1 - \frac{5,3}{h_j}\right)^{\beta_1}} + d_{5,3j}^2 \left(\beta_5 \left(\frac{h_i - 5,3}{h_j - 5,3} - 1 \right)^2 + \frac{(1 - \beta_5) \left(\beta_4 - \frac{h_i - 5,3}{h_j - 5,3} \right)^2}{\beta_4^2} \right) \right)^{0,5}}$$

em que: β_k – coeficientes fixos do modelo; d_j^2 – diâmetro à altura do peito ao quadrado da árvore j , em m^2 ; $d_{5,3j}^2$ – diâmetro à 5,3 metros de altura ao quadrado da árvore j , em m^2 ; h_i – altura de calibração do efeito aleatório μ_i , em m; h_j – altura da árvore j , em m.

Ao organizar a matriz de derivadas parciais, temos que $Z_j = \begin{bmatrix} Z_{h_{0,1}\beta_{2j}} & Z_{h_{0,1}\beta_{5j}} \\ Z_{h_{2,0}\beta_{2j}} & Z_{h_{2,0}\beta_{5j}} \end{bmatrix}$. E para a matriz \hat{R}_j - matriz de variância residual - $\hat{R}_j = \sigma^2 \therefore \hat{R}_j = 0,9145$.

Os resíduos do ajuste na posição i para a árvore j (res_{ij}) será definido pela diferença do diâmetro na posição i real com o diâmetro estimado na posição i somente com os coeficientes fixos da equação. Desta forma, como a calibração será realizada com dois pontos de mudança:

$$res_{ij} = (d_{ij} - \widehat{d}_{ij}) \therefore \begin{vmatrix} d_{0,1j} - \widehat{d}_{0,1j} \\ d_{2,0j} - \widehat{d}_{2,0j} \end{vmatrix}$$

Considerando as informações da árvore 3 do banco de dados de ajuste como um exemplo da calibração dos efeitos aleatórios, seguem as etapas:

Árv (j)	d _j (cm)	h _j (m)	d _{0,1j} (cm)	d _{2,0j} (cm)	d _{5,3j} (cm)
3	16	17,6	20,50	15,50	14,31

Primeira etapa do cálculo: $\hat{D}Z_i^T$

$$Etapa1 = \begin{vmatrix} \sigma_{\mu_1}^2 & \sigma_{\mu_1\mu_2} \\ \sigma_{\mu_1\mu_2} & \sigma_{\mu_2}^2 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} Z_{h_{0,1}\beta_{2j}} & Z_{h_{2,0}\beta_{2j}} \\ Z_{h_{0,1}\beta_{5j}} & Z_{h_{2,0}\beta_{5j}} \end{vmatrix}^T \rightarrow \begin{vmatrix} 0,1092 & 0,02391 \\ 0,02391 & 0,1902 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} 3,00212 & -0,16119 \\ -1,74738 & -1,16930 \end{vmatrix}$$

$$Etapa1 = \begin{vmatrix} 0,28605 & -0,045560 \\ -0,26057 & -0,22625 \end{vmatrix}$$

Segunda etapa do cálculo: $Z_i\hat{D}$

$$Etapa2 = \begin{vmatrix} Z_{h_{0,1}\beta_{2j}} & Z_{h_{2,0}\beta_{2j}} \\ Z_{h_{0,1}\beta_{5j}} & Z_{h_{2,0}\beta_{5j}} \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} \sigma_{\mu_1}^2 & \sigma_{\mu_1\mu_2} \\ \sigma_{\mu_1\mu_2} & \sigma_{\mu_2}^2 \end{vmatrix} \rightarrow \begin{vmatrix} 3,00212 & -1,74738 \\ -0,16119 & -1,16930 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} 0,1092 & 0,02391 \\ 0,02391 & 0,1902 \end{vmatrix}$$

$$Etapa2 = \begin{vmatrix} 0,28605 & -0,26057 \\ -0,045560 & -0,22625 \end{vmatrix}$$

Terceira etapa do cálculo: $(Z_i \widehat{D} Z_i^T) + \widehat{R}_j \therefore (Etapa2 * Z_i^T) + \widehat{R}_j$

$$Etapa3 = \begin{vmatrix} Etapa2_{11} & Etapa2_{12} \\ Etapa2_{21} & Etapa2_{22} \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} Z_{h_{0,1}\beta_{2j}} & Z_{h_{2,0}\beta_{2j}} \\ Z_{h_{0,1}\beta_{5j}} & Z_{h_{2,0}\beta_{5j}} \end{vmatrix}^T + \widehat{R}_j$$

$$\rightarrow \begin{vmatrix} 0,28605 & -0,26057 \\ -0,045560 & -0,22625 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} 3,00212 & -0,16119 \\ -1,74738 & -1,16930 \end{vmatrix} + 0,9145$$

$$Etapa3 = \begin{vmatrix} 2,2286 & 1,1731 \\ 1,1731 & 1,1864 \end{vmatrix}$$

Quarta etapa do cálculo: $(Z_i \widehat{D} Z_i^T + \widehat{R}_i)^{-1} \therefore (Etapa3)^{-1}$

$$det = Etapa3_{11} * Etapa3_{22} - Etapa3_{12} * Etapa3_{21} \rightarrow 2,2286 * 1,1864 - 1,1731 * 1,1731$$

$$det = 1,2679$$

$$Etapa4 = \begin{vmatrix} Etapa3_{22}/det & -(Etapa3_{11}/det) \\ -(Etapa3_{21}/det) & Etapa3_{11}/det \end{vmatrix} \rightarrow \begin{vmatrix} 1,1864/1,2679 & -1,1731/1,2679 \\ -1,1731/1,2679 & 2,2286/1,2679 \end{vmatrix}$$

$$Etapa4 = \begin{vmatrix} 0,93574 & -0,92523 \\ -0,92523 & 1,7577 \end{vmatrix}$$

Quinta etapa do cálculo: $(Z_i \widehat{D} Z_i^T + \widehat{R}_i)^{-1} * res_j \therefore (Etapa4) * res_j$

$$Etapa5 = \begin{vmatrix} Etapa4_{11} & Etapa4_{12} \\ Etapa4_{21} & Etapa4_{22} \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} d_{0,1j} - \widehat{d_{0,1j}} \\ d_{2,0j} - \widehat{d_{2,0j}} \end{vmatrix} \rightarrow \begin{vmatrix} 0,93574 & -0,92523 \\ -0,92523 & 1,7577 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} -1,4447 \\ 0,061932 \end{vmatrix}$$

$$Etapa5 = \begin{vmatrix} -1,4091 \\ 1,4455 \end{vmatrix}$$

Efeitos aleatórios: $\widehat{\mu}_j = \widehat{D} Z_i^T (Z_i \widehat{D} Z_i^T + \widehat{R}_i)^{-1} res_{ij} \therefore (Etapa1) * (Etapa5)$

$$\begin{vmatrix} \mu_{1j} \\ \mu_{2j} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Etapa1_{11} & Etapa1_{12} \\ Etapa1_{21} & Etapa1_{22} \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} Etapa5_{11} \\ Etapa5_{21} \end{vmatrix} \rightarrow \begin{vmatrix} 0,28605 & -0,045560 \\ -0,26057 & -0,22625 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} -1,4447 \\ 0,061932 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} \mu_{1j} \\ \mu_{2j} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -0,46894 \\ 0,040127 \end{vmatrix}$$

Fonte: o autor.

APÊNDICE C – VALORES MÍNIMOS, MÉDIOS E MÁXIMOS DE DAP E ALTURA TOTAL DOS PONTOS DE MUDANÇA DE FORMA DO FUSTE POR CLASSE DIAMÉTRICA UTILIZANDO O MODELO DE SCHÖEPFER (1966) PARA *Tectona grandis* L.F., 2018

Classe DAP	VALORES MÉDIOS POR CLASSE DE DAP – Modelo Schöpfer (1966)								
	PMF ₁	PMF ₂	PMF ₃	y1 (di)	x1 (hi)	y2 (di)	x2 (hi)	y3 (di)	x3 (hi)
1	0,26	0,50	0,69	11,01	3,6	8,25	6,9	7,16	9,5
2	0,28	0,55	0,76	14,00	4,8	11,20	9,4	6,03	13,1
3	0,28	0,57	0,73	16,37	5,1	14,08	10,4	7,91	13,4
4	0,29	0,61	0,76	21,21	6,1	18,79	13,0	11,04	16,1
5	0,29	0,64	0,79	24,21	6,5	18,14	14,4	9,69	17,9
6	0,27	0,54	0,73	28,32	7,0	22,63	14,3	13,59	19,2
7	0,27	0,54	0,76	31,11	7,2	26,98	14,6	12,53	19,9
8	0,27	0,56	0,72	33,63	7,3	23,25	15,3	15,56	19,5
9	0,31	0,65	0,69	33,02	8,8	41,97	19,1	18,34	19,6
10	0,30	0,57	0,68	40,82	7,7	57,26	16,0	24,11	17,2
Mínimo	0,26	0,50	0,68	11,01	3,6	8,25	6,9	6,03	9,5
Máximo	0,31	0,65	0,79	40,82	8,8	57,26	19,1	24,11	19,9
Média	0,28	0,57	0,73	25,37	6,4	24,26	13,3	12,59	16,5

Classe DAP	VALORES MÍNIMOS POR CLASSE DE DAP – Modelo Schöpfer (1966)								
	PMF ₁	PMF ₂	PMF ₃	y1 (di)	x1 (hi)	y2 (di)	x2 (hi)	y3 (di)	x3 (hi)
1	0,18	0,31	0,57	9,70	2,0	6,34	3,8	3,79	6,3
2	0,22	0,42	0,65	11,88	3,8	6,30	7,0	2,66	11,5
3	0,23	0,46	0,63	13,44	3,9	6,89	8,0	4,82	10,7
4	0,23	0,50	0,65	19,40	5,3	12,86	11,2	6,94	13,6
5	0,25	0,55	0,68	21,99	5,7	10,76	12,5	2,93	15,1
6	0,23	0,48	0,63	25,75	5,8	18,37	10,9	5,84	14,5
7	0,22	0,42	0,67	28,14	5,3	17,05	11,5	5,30	15,6
8	0,23	0,48	0,65	30,91	5,9	18,97	12,7	9,61	16,8
9	0,29	0,65	0,67	32,63	8,3	20,01	19,1	16,67	18,4
10	0,28	0,57	0,66	36,89	7,0	29,08	16,0	21,87	16,5
Mínimo	0,18	0,31	0,57	9,70	2,0	6,30	3,8	2,66	6,3
Máximo	0,29	0,65	0,68	36,89	8,3	29,08	19,1	21,87	18,4
Média	0,23	0,48	0,65	23,07	5,3	14,66	11,3	8,04	13,9

(Continua)

APÊNDICE C – VALORES MÍNIMOS, MÉDIOS E MÁXIMOS DE DAP E ALTURA TOTAL DOS PONTOS DE MUDANÇA DE FORMA DO FUSTE POR CLASSE DIAMÉTRICA UTILIZANDO O MODELO DE SCHÖEPFER (1966) PARA *Tectona grandis* L.F., 2018

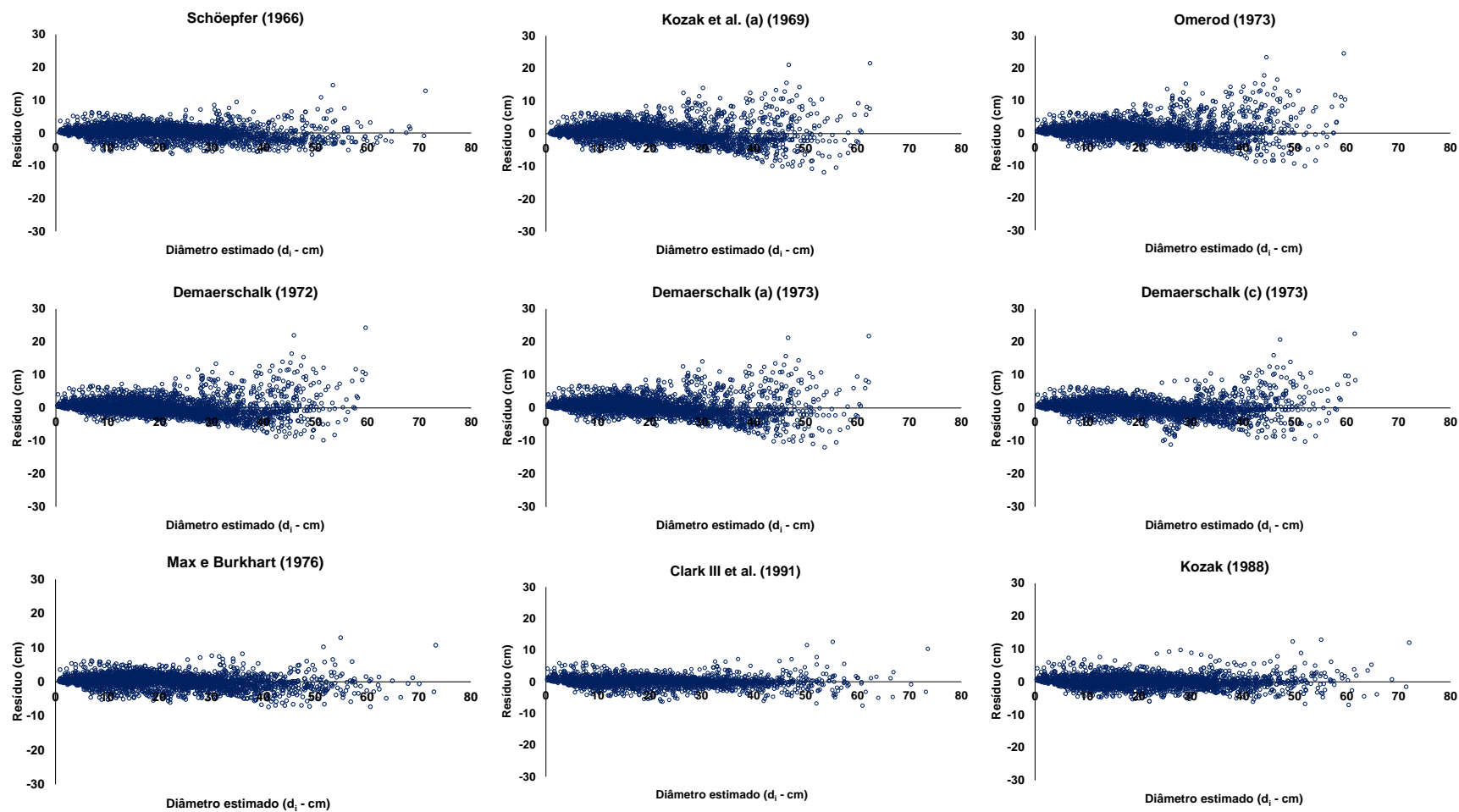
(Continuação)

Classe DAP	VALORES MÁXIMOS POR CLASSE DE DAP – Modelo Schöepfer (1966)								
	PMF ₁	PMF ₂	PMF ₃	y ₁ (d _i)	x ₁ (h _i)	y ₂ (d _i)	x ₂ (h _i)	y ₃ (d _i)	x ₃ (h _i)
1	0,34	0,65	0,80	12,70	4,5	10,39	9,5	19,32	11,8
2	0,40	0,73	0,94	15,64	7,1	23,43	12,2	8,41	16,4
3	0,37	0,74	0,84	19,26	6,5	25,26	15,1	11,32	17,4
4	0,36	0,66	0,84	23,22	7,5	36,10	14,6	15,27	18,5
5	0,34	0,77	0,95	26,64	7,4	40,52	16,4	16,05	21,8
6	0,32	0,63	0,89	31,23	8,8	43,17	17,8	19,62	21,2
7	0,37	0,66	0,94	35,11	9,4	55,94	17,8	20,20	25,5
8	0,30	0,64	0,84	35,71	8,2	26,69	17,8	22,62	23,4
9	0,34	0,65	0,72	33,41	9,3	63,92	19,1	20,00	20,8
10	0,32	0,57	0,71	44,67	8,2	73,20	16,0	26,29	18,5
Mínimo	0,30	0,57	0,71	12,70	4,5	10,39	9,5	8,41	11,8
Máximo	0,40	0,77	0,95	44,67	9,4	73,20	19,1	26,29	25,5
Média	0,35	0,67	0,85	27,76	7,7	39,86	15,6	17,91	19,5

em que: DAP – diâmetro à altura do peito; PMF_n – Ponto de mudança de forma *n*; y_n – diâmetro correspondente ao PMF_n, em cm; x_n – altura correspondente ao PMF_n, em m.

Fonte: o autor.

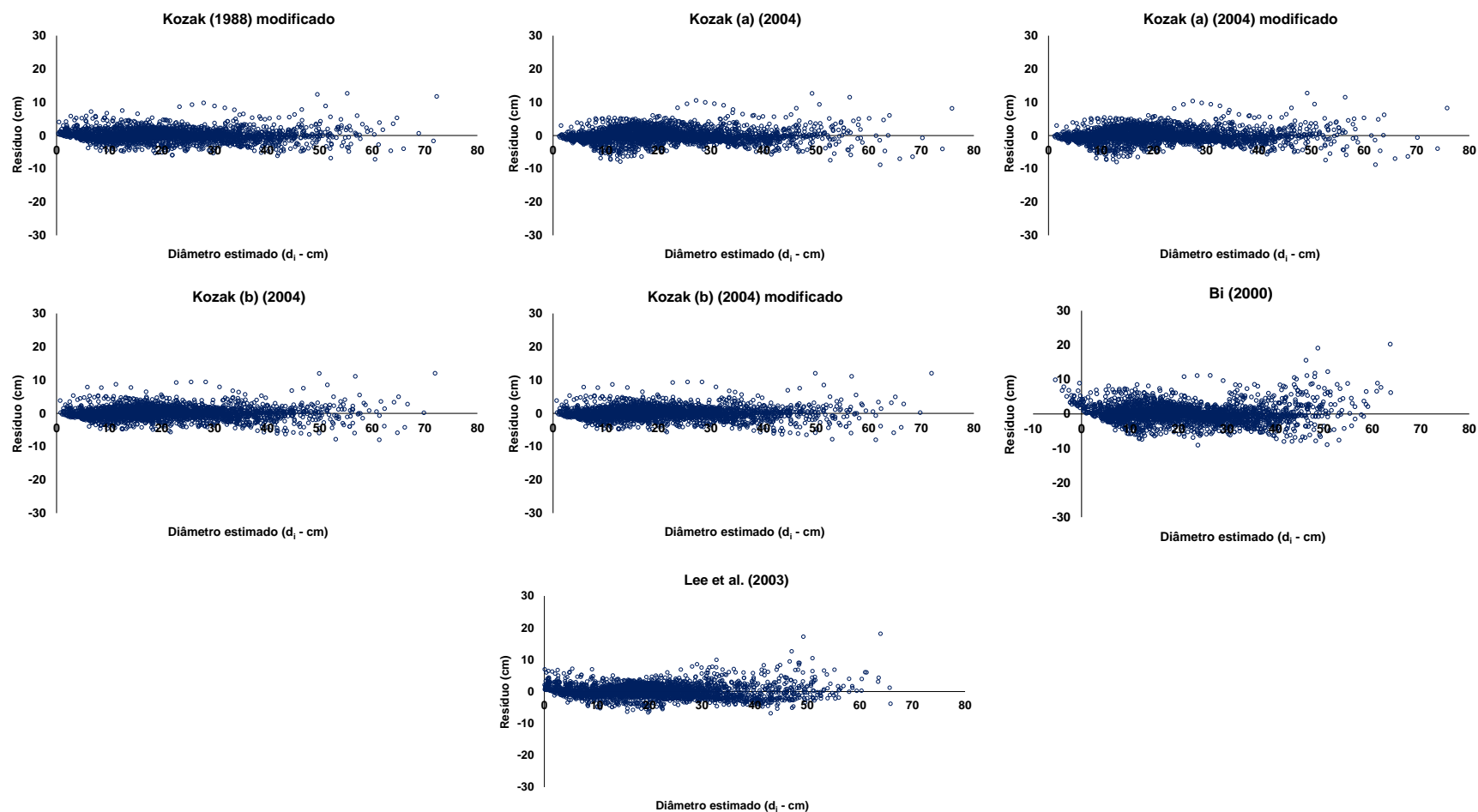
APÊNDICE D – RESÍDUOS DAS ESTIMATIVAS DOS DIÂMETROS AO LONGO DO FUSTE (d_i), PELAS EQUAÇÕES DE AFILAMENTO SEM ESTRATIFICAÇÃO DOS DADOS DE *Tectona grandis* L. F., REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO



(Continua)

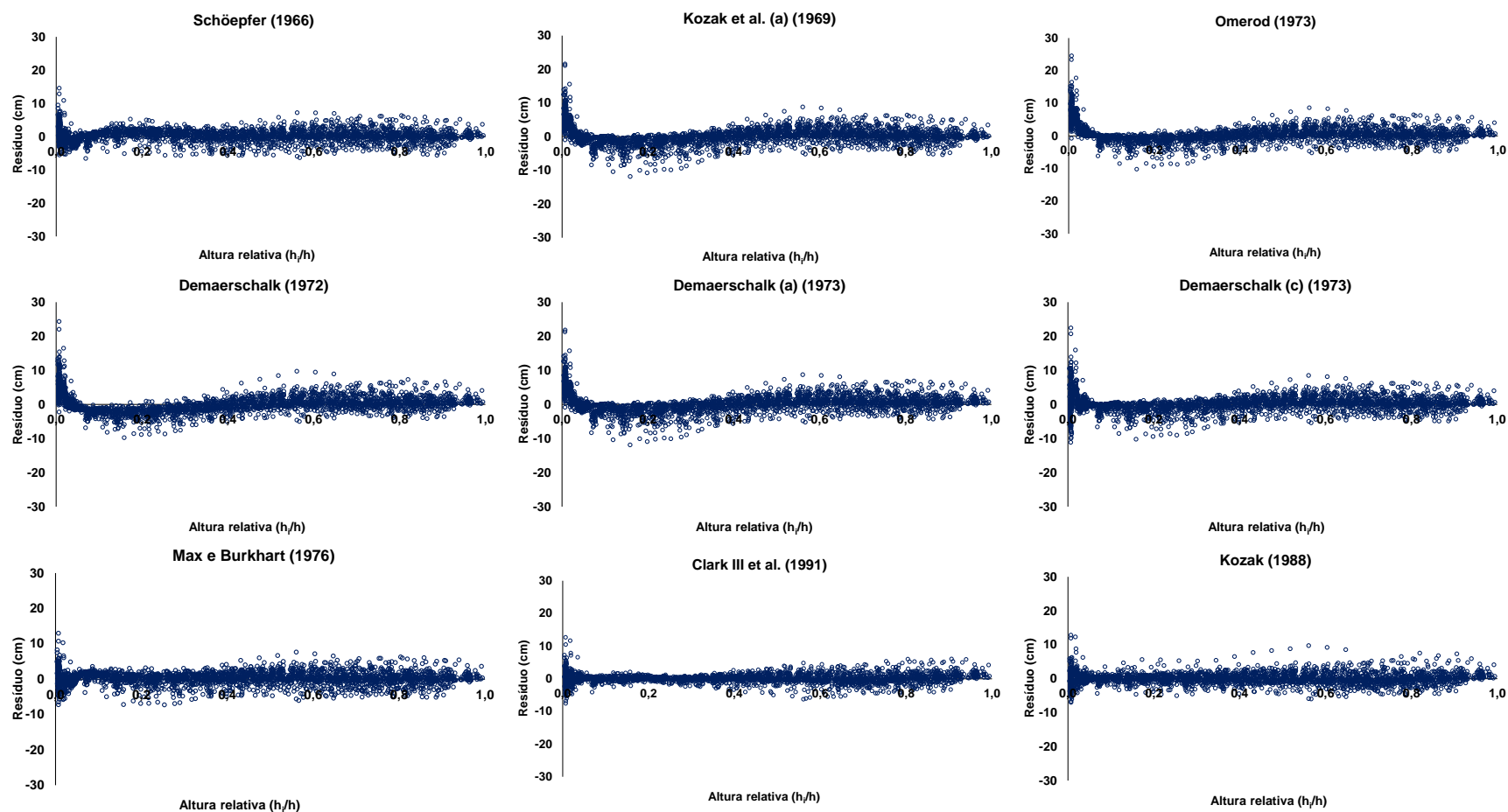
APÊNDICE D – RESÍDUOS DAS ESTIMATIVAS DOS DIÂMETROS AO LONGO DO FUSTE (d_i), PELAS EQUAÇÕES DE AFILAMENTO SEM ESTRATIFICAÇÃO DOS DADOS DE *Tectona grandis* L. F., REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO

(Continuação)



Fonte: o autor.

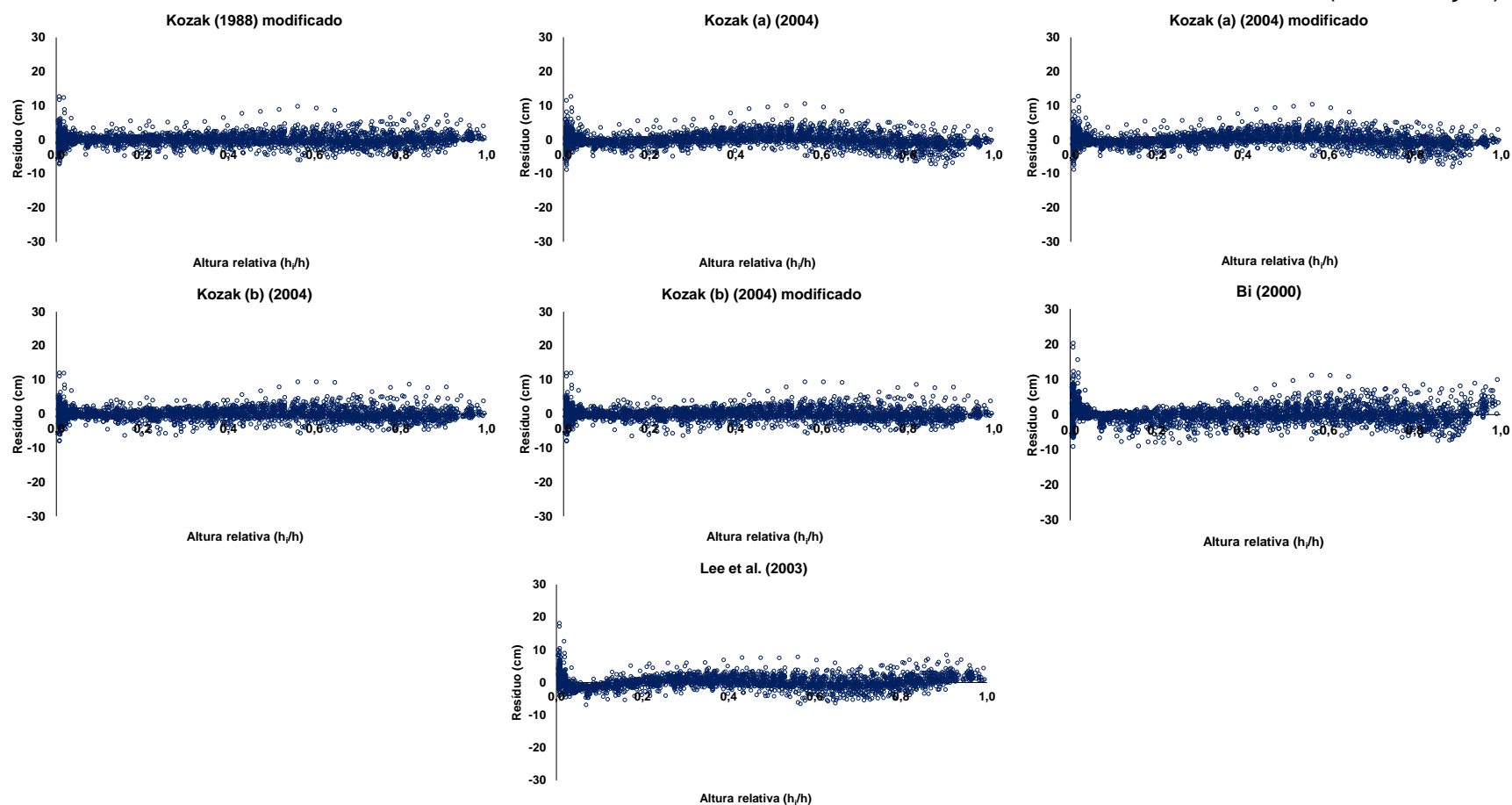
APÊNDICE E – RESÍDUOS DAS ESTIMATIVAS DOS DIÂMETROS EM FUNÇÃO DA ALTURA RELATIVA (h_i/h), PELAS EQUAÇÕES DE AFILAMENTO SEM ESTRATIFICAÇÃO DOS DADOS DE *Tectona grandis* L. F., REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO



(Continua)

APÊNDICE E – RESÍDUOS DAS ESTIMATIVAS DOS DIÂMETROS EM FUNÇÃO DA ALTURA RELATIVA (h_i/h), PELAS EQUAÇÕES DE AFILAMENTO SEM ESTRATIFICAÇÃO DOS DADOS DE *Tectona grandis* L. F., REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO

(Continuação)



Fonte: o autor.

APÊNDICE F – PARÂMETROS ESTIMADOS NOS AJUSTES DO MODELO DE CLARK III ET AL. (1991) E MODIFICAÇÕES ESTRATIFICADOS POR CLASSE DE DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO, PARÂMETRO “r” E FATOR DE FORMA ARTIFICIAL PARA OS DADOS DE *Tectona grandis* L.F., REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO

Classe de DAP	N	Limites de classe de DAP		COEFICIENTES						SQRes	S _{yx} %	R ² _{aj.}
		L _i	L _s	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5			
1	20	10	15	25,5312*	4,4452*	0,8990*	501,7 ^{ns}	0,9291*	4,3836 ^{ns}	78,1	6,82	0,99
2	20	15	20	37,4901*	5,2884*	0,2147 ^{ns}	4440,9*	0,9349*	3,9266*	113,5	4,79	0,98
3	20	20	25	39,2306*	7,1088*	1,0471*	-289,4 ^{ns}	0,7011*	1,7968*	247,6	5,51	0,97
4	20	25	30	52,9505*	8,7417*	0,8343*	6780,6 ^{ns}	0,8340*	3,5092*	886,3	6,95	0,98
5	20	30	35	46,3190*	8,3701*	0,0998*	22981,6*	0,6002*	1,8804*	745,8	6,29	0,98
6	16	35	40	50,7217*	10,0615*	0,8925*	8047,0 ^{ns}	0,7212*	1,9641*	731,3	5,87	0,98
7	18	40	45	37,3756*	7,3781*	1,0970*	-15525,2 ^{ns}	0,5599*	1,4652*	1470,9	7,14	0,98
8	9	45	50	30,9561*	14,4063*	-0,489 ^{ns}	132825,0*	0,5903*	1,5400*	466,1	5,32	0,99
9	2	50	55	-3,1367 ^{ns}	15,7085*	0,5674 ^{ns}	-11842,3 ^{ns}	0,5910*	1,7584*	52,6	4,25	0,99
10	3	55	60	34,6993*	12,6868*	3,0988 ^{ns}	-381868,0 ^{ns}	0,6470*	1,8992*	424,6	9,30	0,99
Conjunto total dos dados (148 árvores)				40,8741*	8,5851*	0,8979*	929,1*	0,6551*	1,8064*	6449,1	7,25	0,98

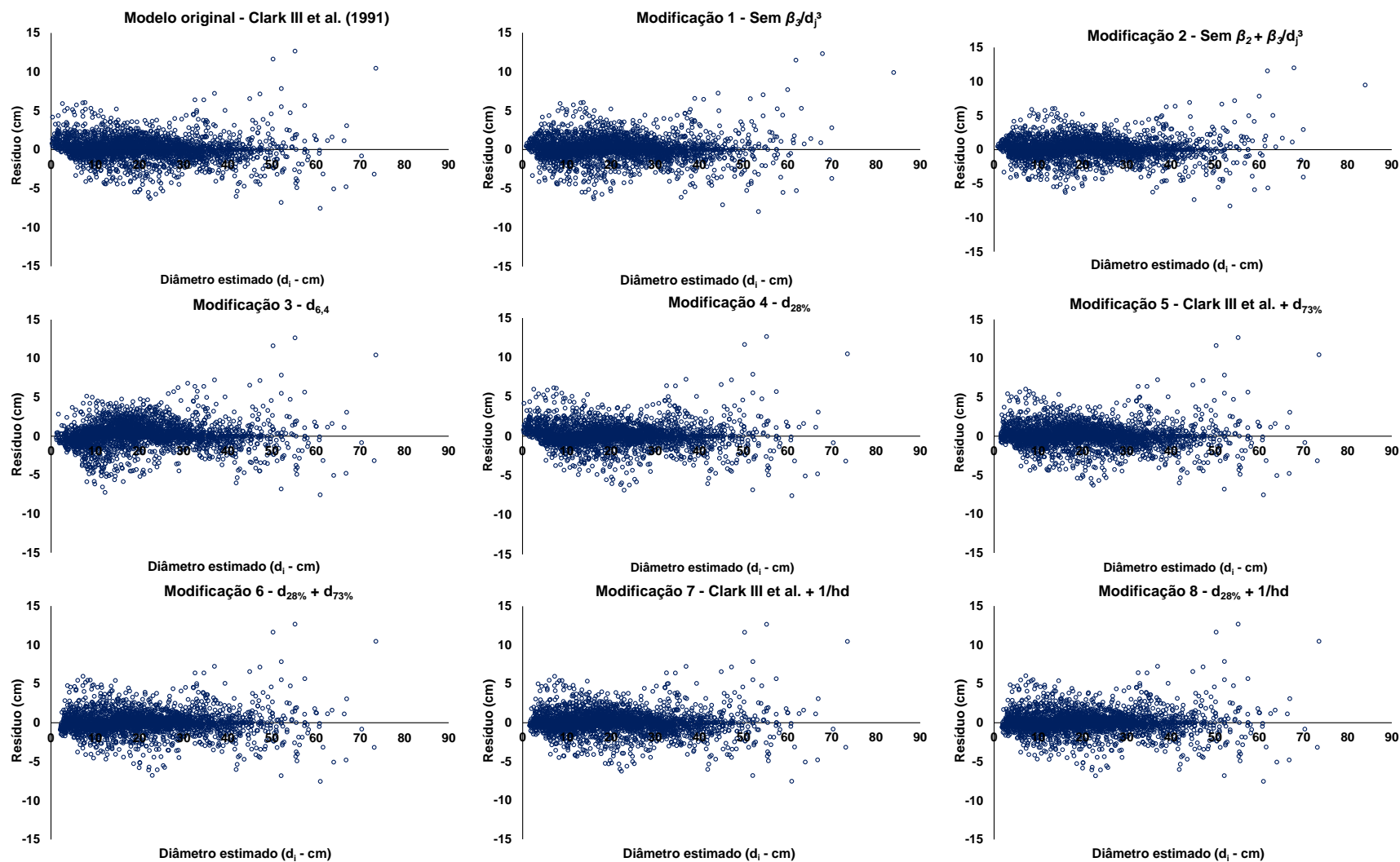
Classe de r	N	Limites de parâmetro “r”		COEFICIENTES						SQRes	S _{yx} %	R ² _{aj.}
		L _i	L _s	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5			
1	85	0,3	0,8	42,6456*	9,6838*	0,9243*	1745,9*	0,7260*	2,0284*	4379,6	7,27	0,98
2	45	0,8	1,3	42,8612*	8,0449*	0,8773*	676,7*	0,5511*	1,6351*	1595,8	6,58	0,99
3	18	1,3	1,8	17,6871*	5,5950*	0,4328*	1846,7*	0,5885*	1,4334*	177,4	5,82	0,99
Conjunto total dos dados (148 árvores)				40,8741*	8,5851*	0,8979*	929,1*	0,6551*	1,8064*	6449,1	7,25	0,98

Classe de f _{1,3}	N	Limites de f _{1,3}		COEFICIENTES						SQRes	S _{yx} %	R ² _{aj.}
		L _i	L _s	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5			
1	32	0,30	0,38	47,6727*	11,8164*	0,8408*	4840,6*	0,5794*	1,4683*	1600,2	5,95	0,99
2	100	0,38	0,46	39,0923*	7,5310*	0,9249*	513,1*	0,6969*	2,0709*	3659,3	6,96	0,98
3	16	0,46	0,54	23,0572*	4,2146*	0,7613*	1166,7*	0,9567*	9,2913*	415,7	7,57	0,98
Conjunto total dos dados (148 árvores)				40,8741*	8,5851*	0,8979*	929,1*	0,6551*	1,8064*	6449,1	7,25	0,98

em que: ^{ns} – não significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro; * – significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro; N – frequência absoluta observada na classe de diâmetro *i*; DAP – diâmetro à altura do peito, em cm; *r* – parâmetro de forma “r”; *f*_{1,3} – fator de forma artificial; *L*_{*i*} – limite inferior da classe; *L*_{*s*} – limite superior da classe.

Fonte: o autor.

APÊNDICE G – RESÍDUOS DAS ESTIMATIVAS DOS DIÂMETROS RELATIVOS, PELAS EQUAÇÕES DE CLARK III ET AL. (1991) E MODIFICAÇÕES PROPOSTAS PARA OS DADOS DE *Tectona grandis* L.F., REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO



Fonte: o autor.

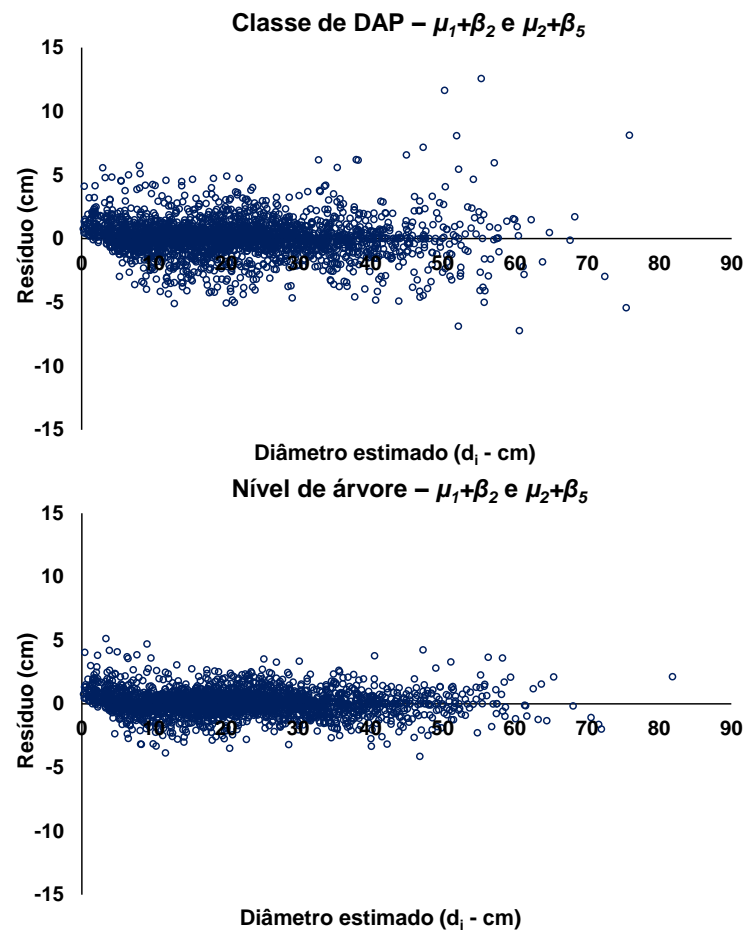
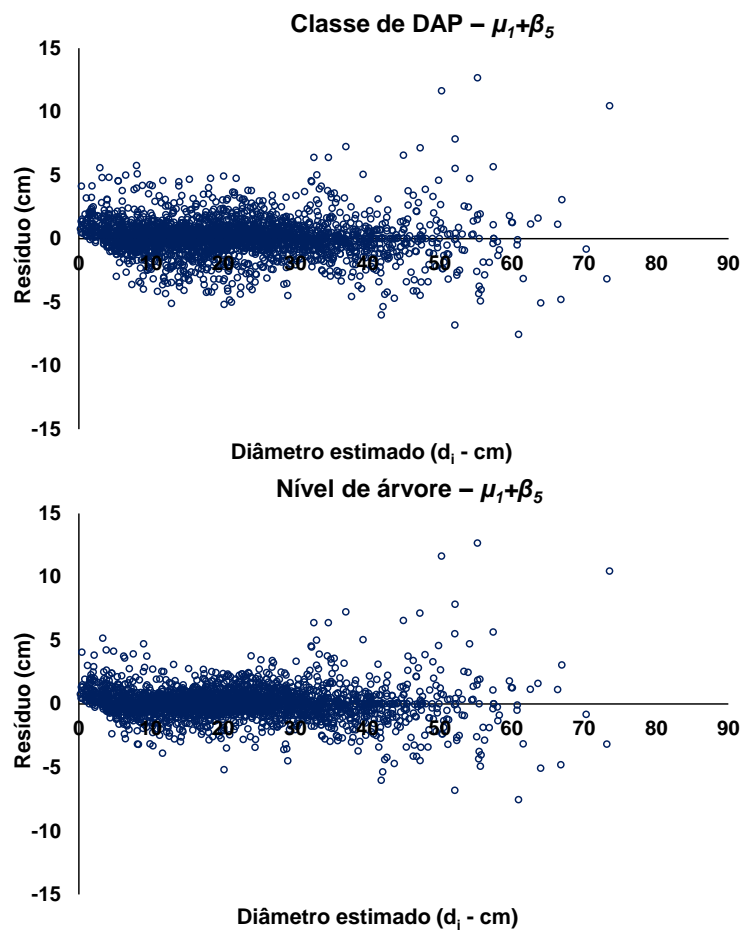
APÊNDICE H – ESTATÍSTICA DO CRITÉRIO INFORMAÇÃO BAYESIANO DE SCHWARZ PARA O AJUSTE DO MODELO DE CLARK III ET AL. (1991) COM A COMBINAÇÃO DE EFEITOS FIXOS E UM EFEITO ALEATÓRIO E PARA A COMBINAÇÃO DE EFEITOS FIXOS E DOIS EFEITOS ALEATÓRIOS, EM NÍVEL DE CLASSE DE DIÂMETRO (DAP) E EM NÍVEL DE ÁRVORE, *Tectona grandis* L.f., REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO

Coeficientes	Nível de classe de DAP	Nível de árvore
β_0	10257,0	9897,1
β_1	10276,0	10300,0
β_2	10235,0	9769,7
β_3	10279,0	10301,0
β_4	10101,0	9797,6
β_5	9975,6	9477,4
$\beta_0 + \beta_1$	10259,0	9906,7
$\beta_0 + \beta_2$	10238,0	9767,0
$\beta_0 + \beta_3$	nota 2	nota 1
$\beta_0 + \beta_4$	10079,0	9087,1
$\beta_0 + \beta_5$	9952,6	8635,1
$\beta_1 + \beta_2$	10237,0	9779,6
$\beta_1 + \beta_3$	nota 1	nota 1
$\beta_1 + \beta_4$	10100,0	9808,4
$\beta_1 + \beta_5$	9975,5	9486,7
$\beta_2 + \beta_3$	nota 1	nota 1
$\beta_2 + \beta_4$	10056,0	8926,1
$\beta_2 + \beta_5$	9927,3	8421,4
$\beta_3 + \beta_4$	nota 1	nota 1
$\beta_3 + \beta_5$	nota 2	9487,4
$\beta_4 + \beta_5$	9949,1	nota 3

em que: BIC - critério de informação Bayesiano de Schwarz; nota 1 - A matriz Hessiana final é completa (*full rank*), mas tem pelo menos um autovalor negativo. Sendo a condição ótima de segunda ordem violada; nota 2 - A matriz Hessiana final não é definida positiva e, portanto, a matriz de covariância estimada não é completa e pode não ser confiável. A variância de algumas estimativas de parâmetro é zero ou alguns parâmetros são linearmente relacionados a outros parâmetros; nota 3 - Pelo menos um elemento do gradiente (projetado) é maior que $1 e^{-3}$.

Fonte: o autor.

APÊNDICE I – RESÍDUOS DAS ESTIMATIVAS DOS DIÂMETROS PELAS EQUAÇÕES DE CLARK III ET AL. (1991), COM EFEITO MISTO, PARA UM E PARA DOIS COEFICIENTES EM NÍVEL DE CLASSE DE DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO (DAP) E EM NÍVEL DE ÁRVORE, PARA OS DADOS DE *Tectona grandis* L.F., REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO



Fonte: o autor.

APÊNDICE J – ESTATÍSTICAS DE AJUSTE E PRECISÃO OBTIDAS NO AJUSTE DO MODELO DE CLARK III ET AL. (1991) COM EFEITO MISTO PARA AS DIFERENTES POSIÇÕES DE CALIBRAÇÃO DOS EFEITOS ALEATÓRIOS, *Tectona grandis* L.F., REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO

Id.		h_i	N árv.	N obs.	SQRes	$S_{yx}\%$	$R^2_{aj.}$
1	Modelo original		100	1668	2215,78	7,95	0,97
2	Somente coeficientes fixos		100	1668	2163,39	7,86	0,97
3		0,1	99	1645	1368,05	6,32	0,98
4		0,5	63	1132	1445,34	7,49	0,97
5		0,7	17	326	680,40	8,33	0,97
6		1,0	71	1384	1820,74	7,94	0,97
7		1,3	100	1668	2208,33	7,94	0,97
8		2,0	64	1167	1250,92	7,64	0,97
9		2,3	17	326	743,86	8,71	0,96
10		3,0	54	1058	1178,47	7,82	0,97
11		3,3	17	326	722,85	8,58	0,96
12		4,0	64	1167	1226,00	7,56	0,97
13		4,3	17	326	716,12	8,54	0,97
14		5,0	54	1058	1152,58	7,74	0,97
15		5,3	100	1668	2163,39	7,86	0,97
16		6,0	64	1167	1210,98	7,52	0,97
17		0,1-0,5	62	1109	2142,83	9,26	0,96
18		0,1-0,7	17	326	718,24	8,57	0,97
19		0,1-1,0	70	1361	1343,39	6,91	0,98
20		0,1-1,3	99	1645	1541,98	6,71	0,98
21		0,1-2,0	63	1142	717,32	5,89	0,98
22		0,1-2,3	17	326	550,42	7,50	0,97
23		0,1-3,0	53	1035	691,26	6,10	0,98
24		0,1-3,3	17	326	563,45	7,59	0,97
25		0,1-4,0	63	1142	738,35	5,98	0,98
26		0,1-4,3	17	326	583,22	7,72	0,97
27		0,1-5,0	53	1035	725,95	6,26	0,98
28		0,1-5,3	99	1645	1464,62	6,54	0,98
29		0,1-6,0	63	1142	773,28	6,12	0,98
30		0,5-0,7	17	326	818,37	9,15	0,96
31		0,5-1,0	53	1023	1707,79	8,52	0,96
32		0,5-1,3	63	1132	1859,56	8,50	0,96
33		0,5-2,0	46	806	1224,14	8,75	0,96
34		0,5-2,3	17	326	716,82	8,56	0,97
35		0,5-3,0	36	697	1157,67	9,16	0,95

(Continua)

**APÊNDICE J – ESTATÍSTICAS DE AJUSTE E PRECISÃO OBTIDAS NO AJUSTE
DO MODELO DE CLARK III ET AL. (1991) COM EFEITO MISTO PARA AS
DIFERENTES POSIÇÕES DE CALIBRAÇÃO DOS EFEITOS ALEATÓRIOS,
Tectona grandis L.F., REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO**

(Continuação)

Id.	h_i	N árv.	N obs.	SQRes	$S_{yx}\%$	$R^2_{aj.}$
36	0,5-3,3	17	326	683,19	8,36	0,97
37	0,5-4,0	46	806	1227,19	8,76	0,96
38	0,5-4,3	17	326	727,11	8,62	0,96
39	0,5-5,0	36	697	954,86	8,32	0,96
40	0,5-5,3	63	1132	1638,74	7,98	0,97
41	0,5-6,0	46	806	878,35	7,41	0,97
42	0,7-1,0	17	326	829,36	9,21	0,96
43	0,7-1,3	17	326	1100,92	10,61	0,95
44	0,7-2,3	17	326	1001,97	10,12	0,95
45	0,7-3,3	17	326	824,89	9,18	0,96
46	0,7-4,3	17	326	849,75	9,32	0,96
47	0,7-5,3	17	326	742,90	8,71	0,96
48	1,0-1,3	71	1384	7024,02	15,59	0,89
49	1,0-2,0	54	1058	2418,16	11,21	0,94
50	1,0-2,3	17	326	1295,98	11,51	0,94
51	1,0-3,0	54	1058	2004,80	10,21	0,95
52	1,0-3,3	17	326	902,92	9,61	0,96
53	1,0-4,0	54	1058	1631,89	9,21	0,96
54	1,0-4,3	17	326	713,65	8,54	0,97
55	1,0-5,0	54	1058	1275,26	8,14	0,97
56	1,0-5,3	71	1384	1987,73	10,16	0,97
57	1,0-6,0	54	1058	1189,88	7,86	0,97
58	1,3-2,0	64	1165	4829,66	15,07	0,89
59	1,3-2,3	17	326	2154,31	14,84	0,90
60	1,3-3,0	54	1058	3048,97	12,60	0,92
61	1,3-3,3	17	326	1390,19	11,92	0,93
62	1,3-4,0	64	1165	2158,78	10,06	0,95
63	1,3-4,3	17	326	1218,05	11,16	0,94
64	1,3-5,0	54	1058	1413,63	8,57	0,96
65	1,3-5,3	100	1668	2424,57	11,18	0,97
66	1,3-6,0	64	1165	1318,23	7,86	0,97
67	2,0-3,0	54	1058	3489,63	13,47	0,91
68	2,0-4,0	64	1165	2198,02	10,15	0,95
69	2,0-5,0	54	1058	1552,39	8,98	0,96
70	2,0-5,3	64	1165	1587,15	8,62	0,96

(Continua)

APÊNDICE J – ESTATÍSTICAS DE AJUSTE E PRECISÃO OBTIDAS NO AJUSTE DO MODELO DE CLARK III ET AL. (1991) COM EFEITO MISTO PARA AS DIFERENTES POSIÇÕES DE CALIBRAÇÃO DOS EFEITOS ALEATÓRIOS, *Tectona grandis* L.F., REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO

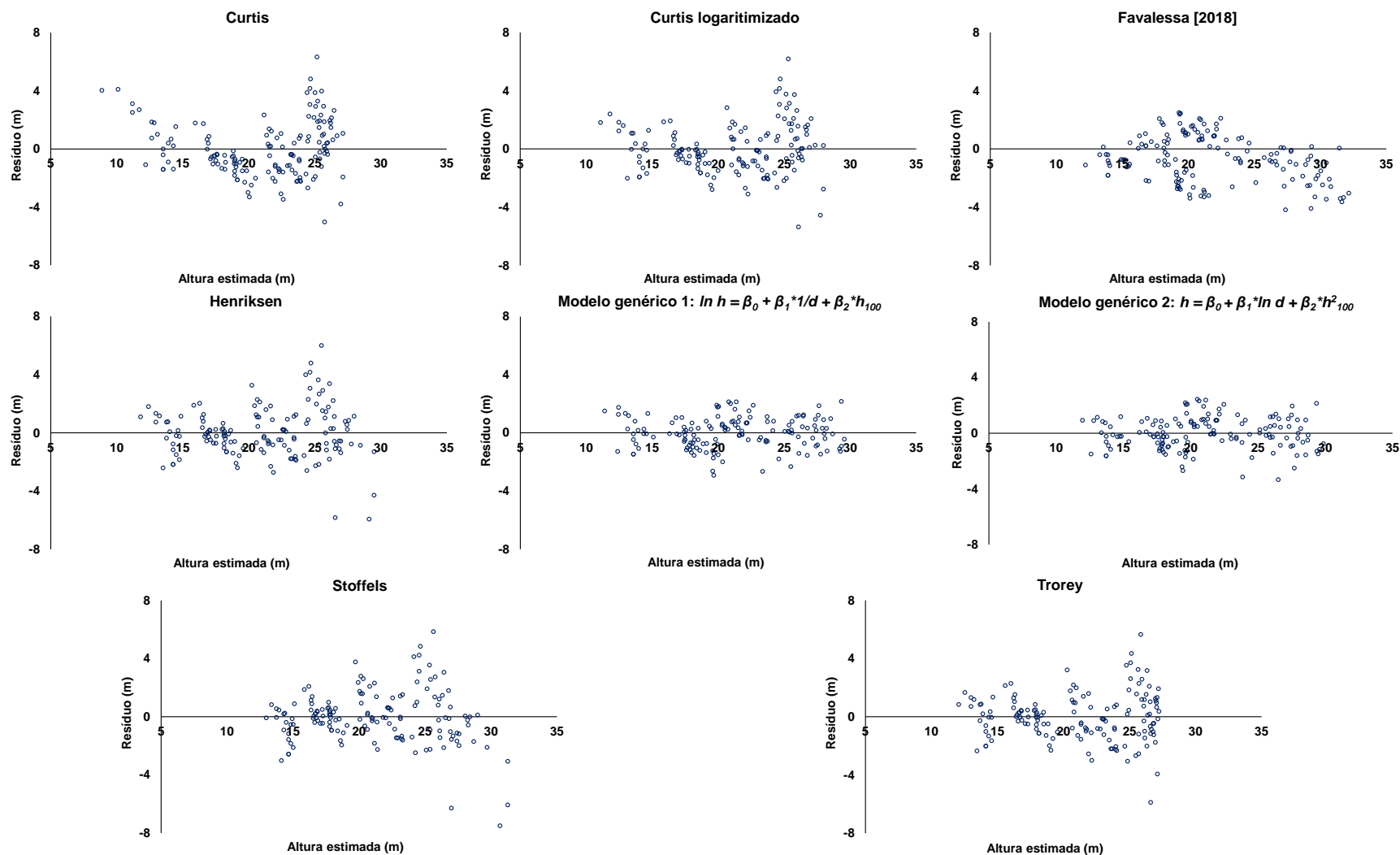
(Continuação)

Id.	h_i	N árv.	N obs.	SQRes	$S_{yx}\%$	$R^2_{aj.}$
71	2,0-6,0	64	1165	1529,48	8,46	0,97
72	2,3-3,3	17	326	1487,38	12,33	0,93
73	2,3-4,3	17	326	1298,93	11,52	0,94
74	2,3-5,3	17	326	920,66	9,70	0,96
75	3,0-4,0	54	1058	2143,55	10,56	0,95
76	3,0-5,0	54	1058	2280,32	10,88	0,94
77	3,0-5,3	54	1058	2272,75	10,86	0,94
78	3,0-6,0	54	1058	2159,57	10,58	0,95
79	3,3-4,3	17	326	1717,57	13,25	0,92
80	3,3-5,3	17	326	1304,69	11,55	0,94
81	4,0-5,0	54	1058	3639,99	13,74	0,90
82	4,0-5,3	64	1165	3354,42	13,93	0,90
83	4,0-6,0	64	1165	3122,76	12,07	0,93
84	4,3-5,3	17	326	2254,00	15,05	0,87
85	5,0-5,3	54	1058	4756,78	15,62	0,86
86	5,0-6,0	54	1058	2637,94	11,67	0,93
87	5,3-6,0	64	1165	2442,51	10,68	0,94

em que: Id. – identificação do modelo; h_i – posição relativa, em m; N árv. – número de árvores utilizadas para o ajuste; N obs. – número de observações utilizadas para o ajuste; SQRes – soma de quadrado dos resíduos; $S_{yx}\%$ - erro padrão da estimativa em porcentagem; $R^2_{aj.}$ – coeficiente de determinação ajustado.

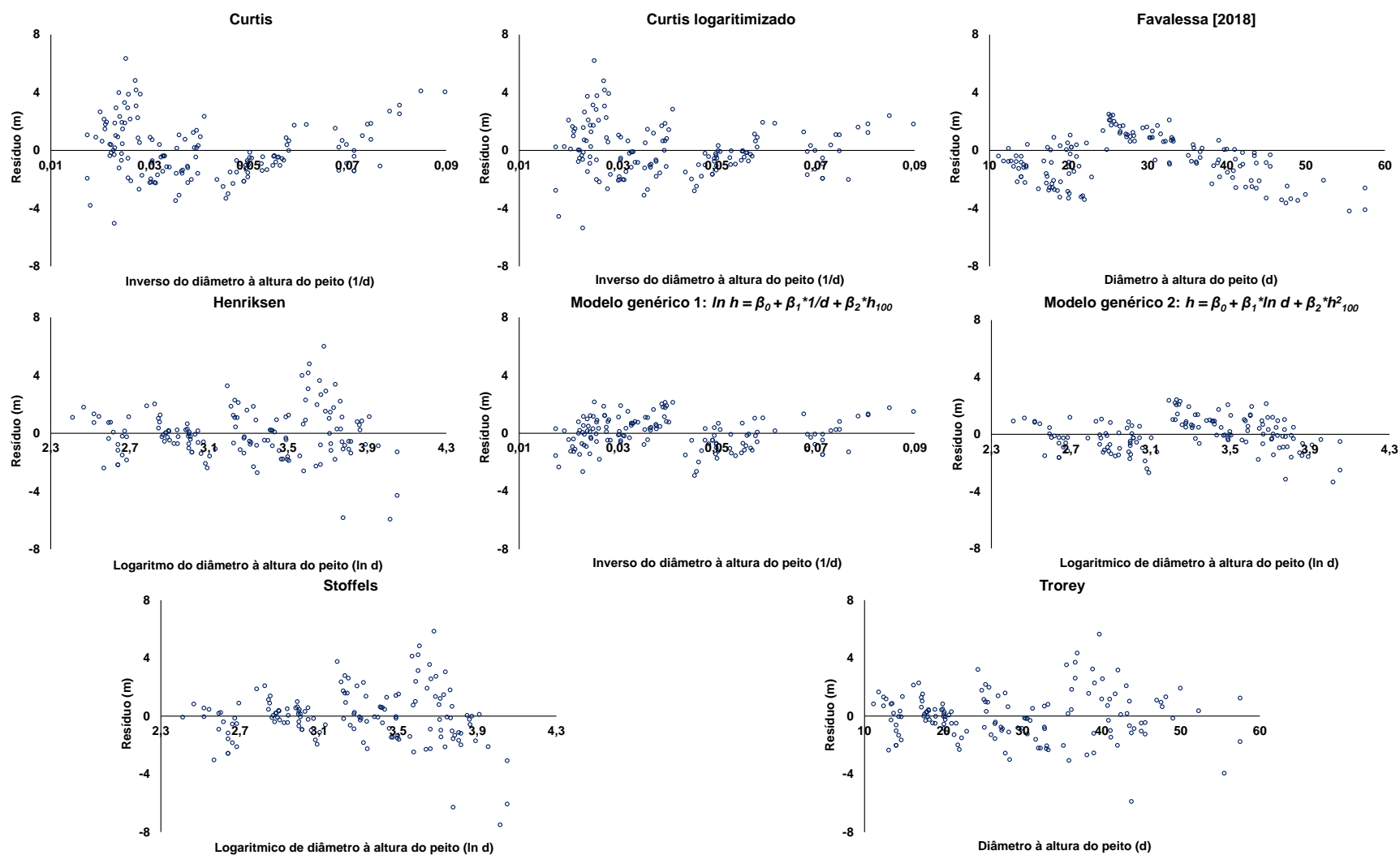
Fonte: o autor.

APÊNDICE K – RESÍDUOS DAS ESTIMATIVAS DAS ALTURAS EM FUNÇÃO DAS ALTURAS ESTIMADAS, DESENVOLVIDOS PELAS RELAÇÕES HIPSOMÉTRICAS AJUSTADAS PARA *Tectona grandis* L. F., REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO



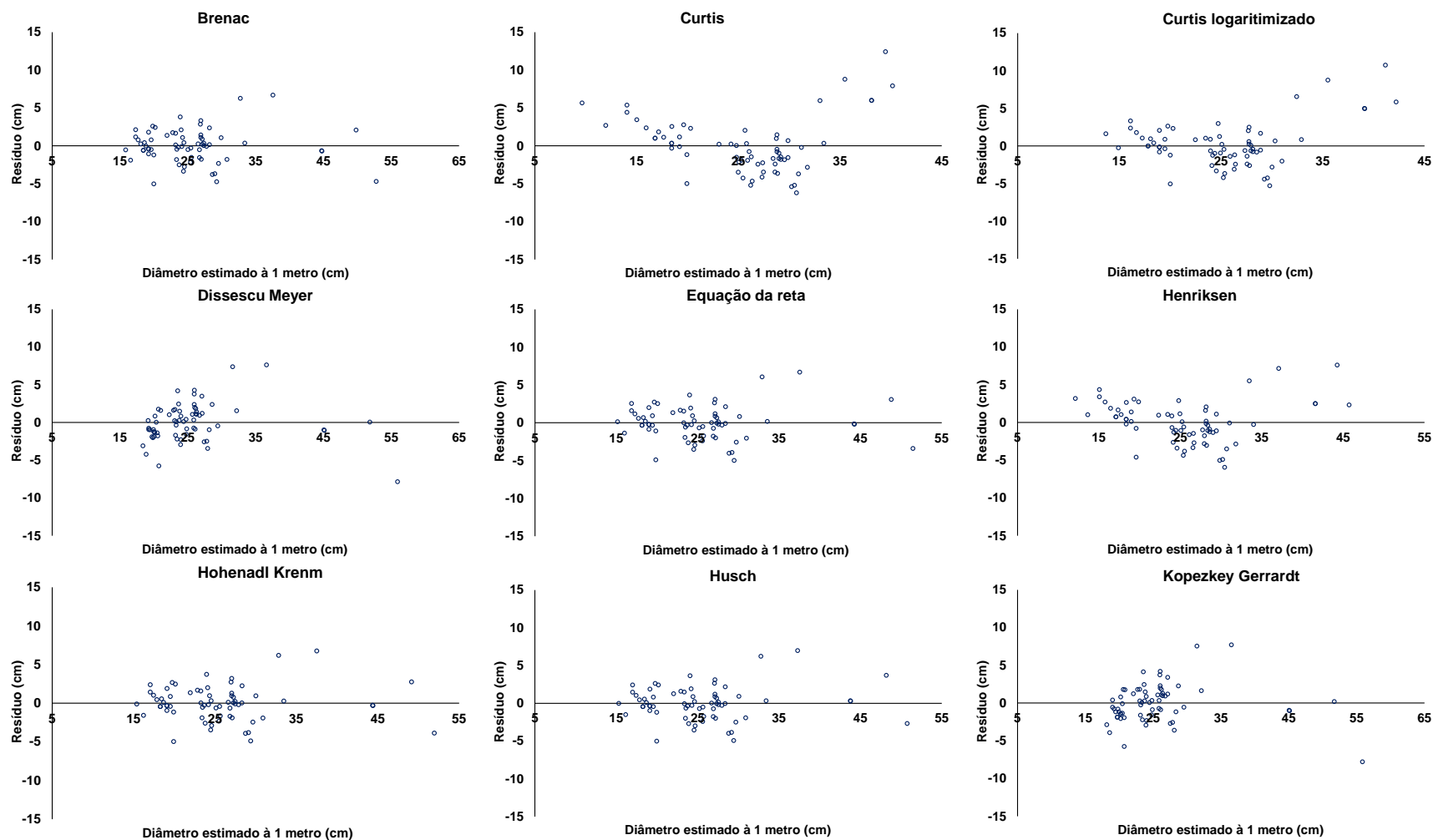
Fonte: o autor.

APÊNDICE L – RESÍDUOS DAS ESTIMATIVAS DAS ALTURAS EM FUNÇÃO DA VARIÁVEL INDEPENDENTE DOS MODELOS DE RELAÇÃO HIPSOMÉTRICA AJUSTADOS PARA *Tectona grandis* L. F., REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO



Fonte: o autor.

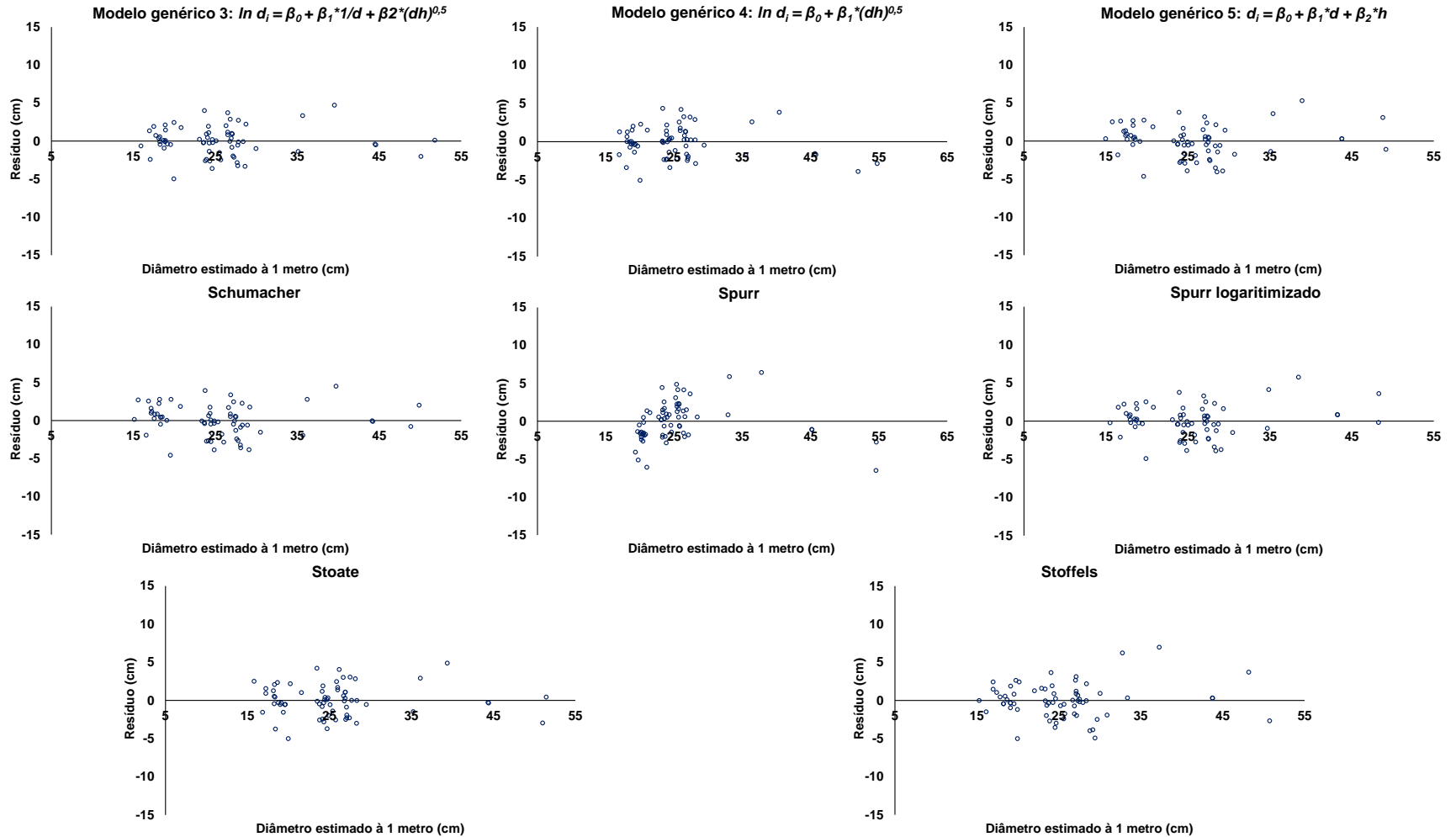
APÊNDICE M – RESÍDUOS DAS ESTIMATIVAS DOS DIÂMETROS À 0,1 M DE ALTURA, PELAS EQUAÇÕES DE AFILAMENTO SEM ESTRATIFICAÇÃO DOS DADOS DE *Tectona grandis* L. F., REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO



(Continua)

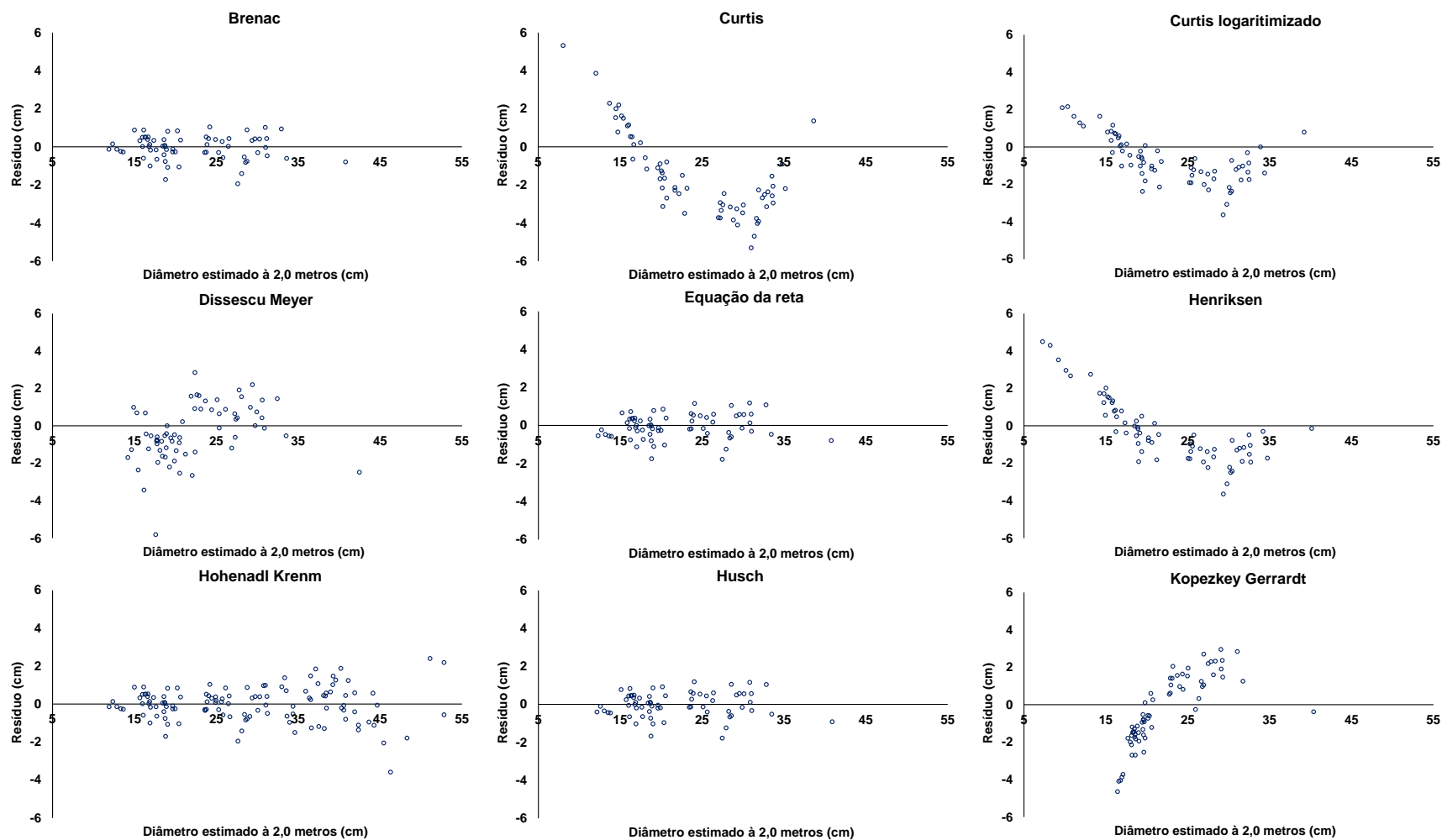
APÊNDICE M – RESÍDUOS DAS ESTIMATIVAS DOS DIÂMETROS À 0,1 M DE ALTURA, PELAS EQUAÇÕES DE AFILAMENTO SEM ESTRATIFICAÇÃO DOS DADOS DE *Tectona grandis* L. F., REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO

(Continuação)



Fonte: o autor.

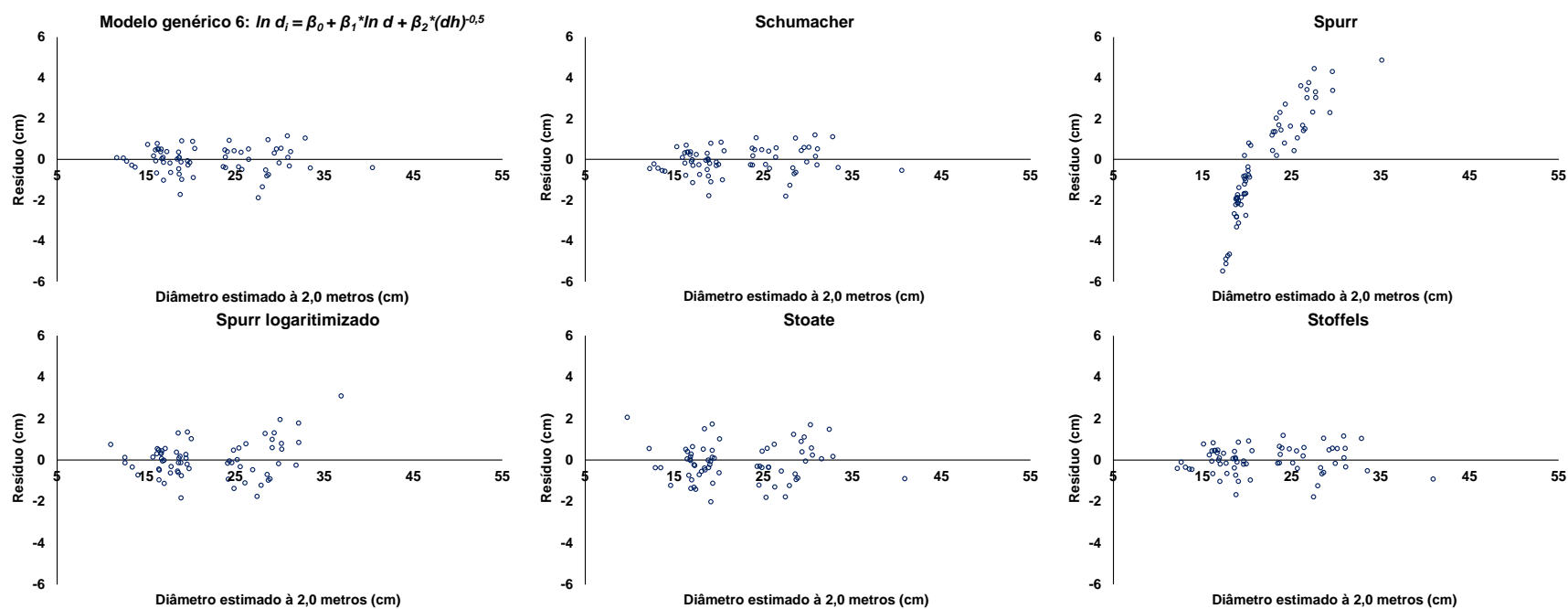
APÊNDICE N – RESÍDUOS DAS ESTIMATIVAS DOS DIÂMETROS À 2,0 M DE ALTURA, PELAS EQUAÇÕES DE AFILAMENTO SEM ESTRATIFICAÇÃO DOS DADOS DE *Tectona grandis* L. F., REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO



(Continua)

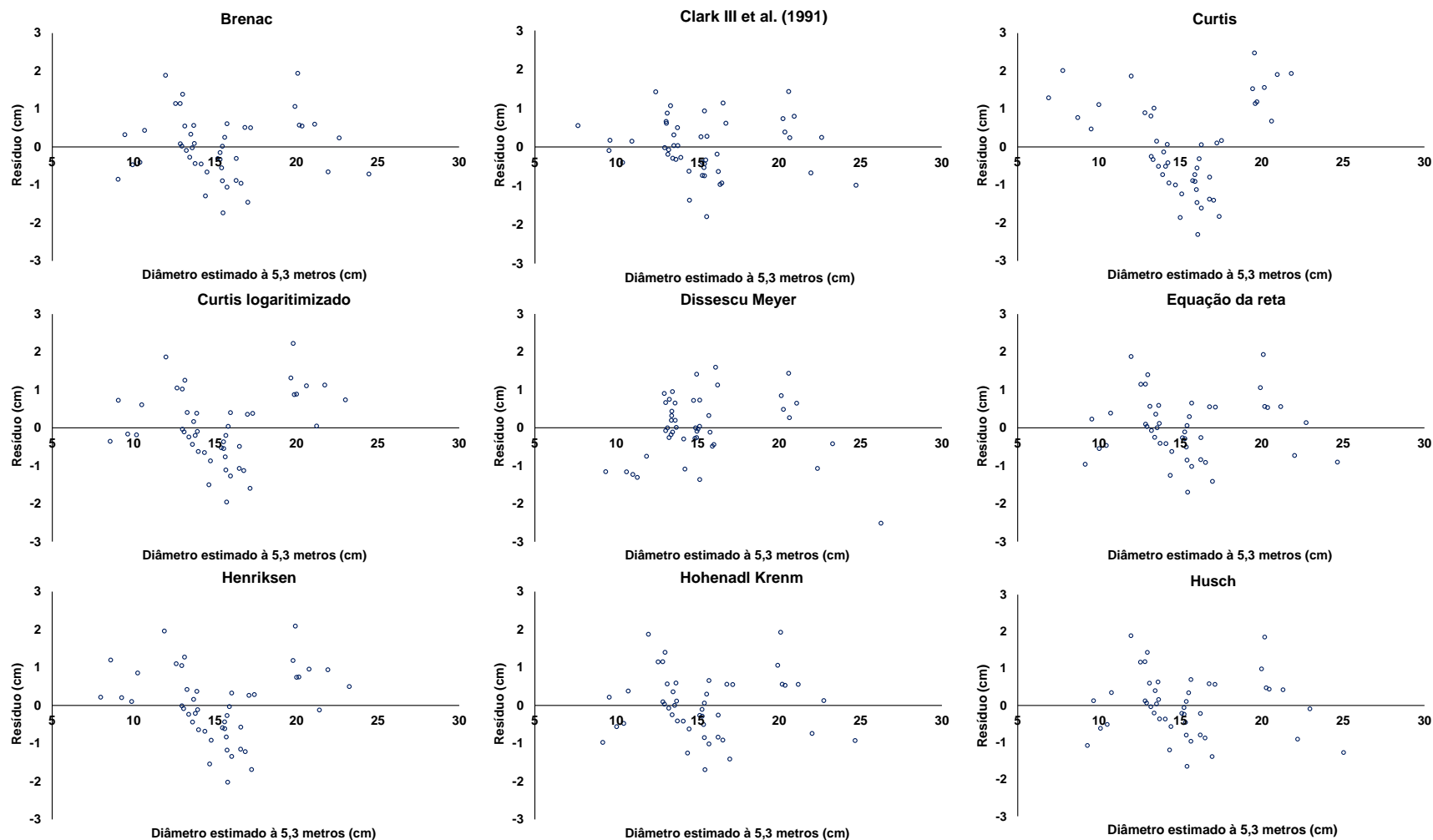
APÊNDICE N – RESÍDUOS DAS ESTIMATIVAS DOS DIÂMETROS À 2,0 M DE ALTURA, PELAS EQUAÇÕES DE AFILAMENTO SEM ESTRATIFICAÇÃO DOS DADOS DE *Tectona grandis* L. F., REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO

(Continuação)



Fonte: o autor.

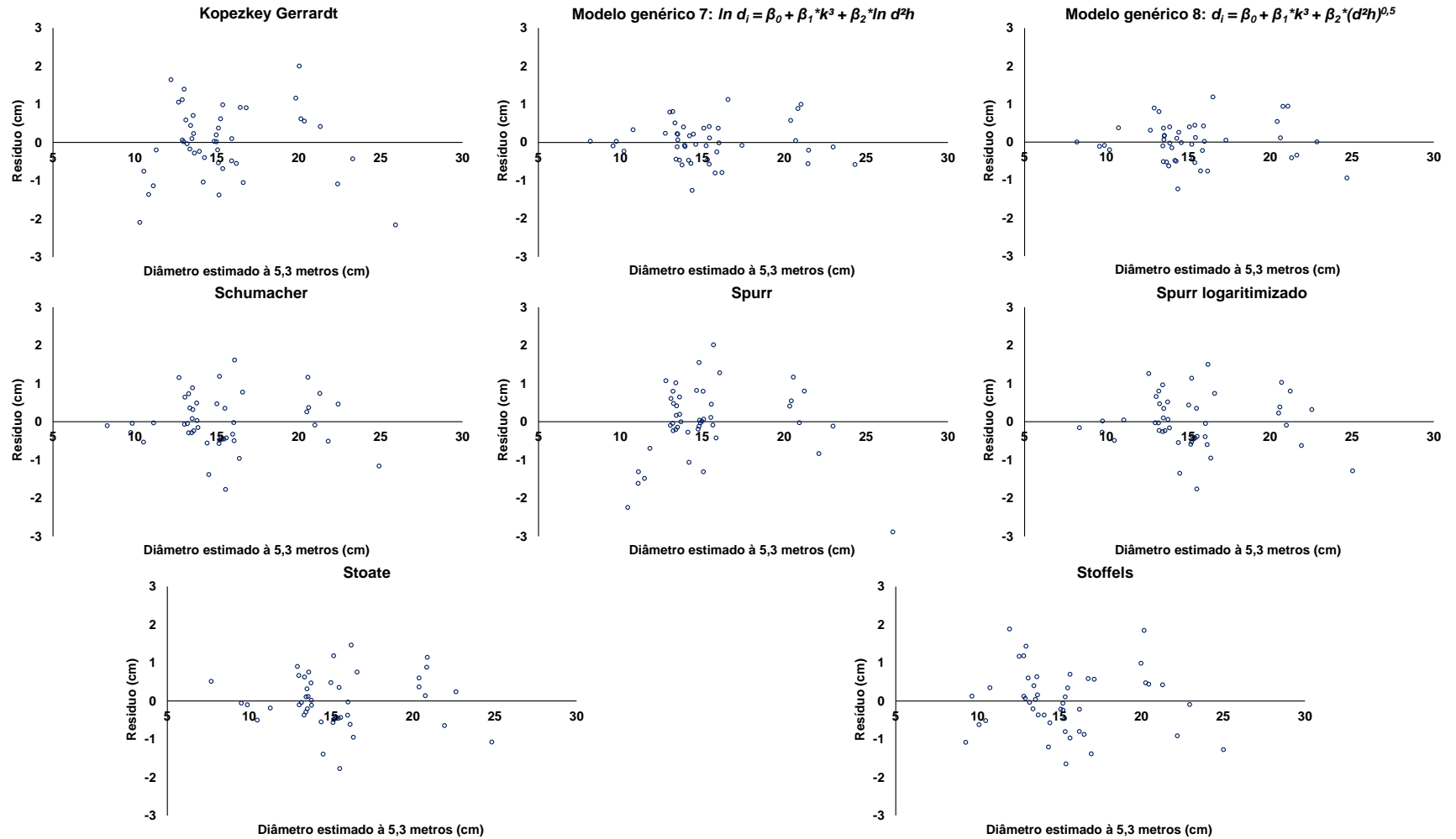
APÊNDICE O – RESÍDUOS DAS ESTIMATIVAS DOS DIÂMETROS À 5,3 M DE ALTURA, PELAS EQUAÇÕES DE AFILAMENTO SEM ESTRATIFICAÇÃO DOS DADOS DE *Tectona grandis* L. F., REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO



(Continua)

APÊNDICE O – RESÍDUOS DAS ESTIMATIVAS DOS DIÂMETROS À 5,3 M DE ALTURA, PELAS EQUAÇÕES DE AFILAMENTO SEM ESTRATIFICAÇÃO DOS DADOS DE *Tectona grandis* L. F., REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO

(Continuação)



Fonte: o autor.

APÊNDICE P – MAXIMIZAÇÃO DA RECEITA DOS SORTIMENTOS DA ÁRVORE CENTRAL NA OCASIÃO DE DESBASTES PARA O SÍTIO DE 21 METROS, PARA *Tectona grandis* L.f. PELO MODELO DE CLARK III ET AL. (1991), COM EFEITO MISTO, REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO

t	d	h	h/d	v _{toco}	S1		S2		S3		S4		S5		V _{total}	Resíduo
					n	m ³	n	m ³	n	m ³	n	m ³	n	m ³		
	4	6,4	1,59	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0,0018	0,0028
	6	9,5	1,58	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0,0116	0,0117
	8	11,7	1,46	0,0007	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	1	0,0055	0,0265	0,0203
	10	13,4	1,34	0,0015	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	5	0,0310	0,0473	0,0149
5	12	14,8	1,23	0,0023	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	8	0,0621	0,0748	0,0104
	14	16,0	1,14	0,0033	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	10	0,0974	0,1094	0,0087
	16	17,0	1,06	0,0043	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	11	0,1367	0,1511	0,0101
	18	17,9	0,99	0,0055	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	13	0,1885	0,2004	0,0064
	20	18,7	0,94	0,0067	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	14	0,2442	0,2573	0,0064
	12	14,8	1,23	0,0023	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	8	0,0621	0,0748	0,0104
	14	16,0	1,14	0,0033	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	10	0,0974	0,1094	0,0087
	16	17,0	1,06	0,0043	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	11	0,1367	0,1511	0,0101
8	18	17,9	0,99	0,0055	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	13	0,1885	0,2004	0,0064
	20	18,7	0,94	0,0067	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	14	0,2442	0,2573	0,0064
	22	19,4	0,88	0,0079	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	1	0,0999	12	0,2054	0,3220	0,0088
	24	20,1	0,84	0,0093	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	2	0,1964	13	0,1831	0,3947	0,0060
	26	20,7	0,80	0,0107	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	3	0,3070	9	0,1495	0,4757	0,0084
	16	17,0	1,06	0,0043	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	11	0,1367	0,1511	0,0101
	18	17,9	0,99	0,0055	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	13	0,1885	0,2004	0,0064
	20	18,7	0,94	0,0067	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	14	0,2442	0,2573	0,0064
11	22	19,4	0,88	0,0079	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	1	0,0999	12	0,2054	0,3220	0,0088
	24	20,1	0,84	0,0093	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	2	0,1964	13	0,1831	0,3947	0,0060
	26	20,7	0,80	0,0107	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	3	0,3070	9	0,1495	0,4757	0,0084
	28	21,3	0,76	0,0122	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	3	0,3579	10	0,1876	0,5650	0,0073
	30	21,8	0,73	0,0138	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	4	0,4968	8	0,1449	0,6628	0,0074

em que: t – idade, em anos; d – classe de diâmetro à altura do peito (cm); h – altura (m); h/d – relação entre a altura e o diâmetro à altura do peito (DAP); v_{toco} – volume do toco, considerando a altura de corte de 10 cm (m³); n – número de toras por sortimento; m³ - volume em metros cúbicos por sortimento; S1 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 49 cm, e 4,6 m de comprimento; S2 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 39 cm, e 3,7 m de comprimento; S3 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 29 cm, e 2,4 m de comprimento; S4 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 19 cm, e 2,4 m de comprimento; S5 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 7 cm, e 1,0 m de comprimento; Resíduo – em m³.

Fonte: o autor.

APÊNDICE Q – MAXIMIZAÇÃO DO VOLUME DOS SORTIMENTOS PARA *Tectona grandis* L.f. PELO MODELO DE CLARK III ET AL. (1991), COM EFEITO MISTO, NA OCASIÃO DE DESBASTES PARA O SITIO DE 21 METROS, REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO

t	d	h	h/d	v _{toco}	S1		S2		S3		S4		S5		V _{total}	Resíduo
					n	m ³	n	m ³	n	m ³	n	m ³	n	m ³		
	4	6,4	1,59	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0,0018	0,0028
	6	9,5	1,58	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0,0116	0,0117
	8	11,7	1,46	0,0007	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	1	0,0055	0,0265	0,0203
	10	13,4	1,34	0,0015	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	5	0,0310	0,0473	0,0149
5	12	14,8	1,23	0,0023	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	8	0,0621	0,0748	0,0104
	14	16,0	1,14	0,0033	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	10	0,0974	0,1094	0,0087
	16	17,0	1,06	0,0043	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	11	0,1367	0,1511	0,0101
	18	17,9	0,99	0,0055	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	13	0,1885	0,2004	0,0064
	20	18,7	0,94	0,0067	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	14	0,2442	0,2573	0,0064
	12	14,8	1,23	0,0023	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	8	0,0621	0,0748	0,0104
	14	16,0	1,14	0,0033	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	10	0,0974	0,1094	0,0087
	16	17,0	1,06	0,0043	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	11	0,1367	0,1511	0,0101
8	18	17,9	0,99	0,0055	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	13	0,1885	0,2004	0,0064
	20	18,7	0,94	0,0067	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	14	0,2442	0,2573	0,0064
	22	19,4	0,88	0,0079	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	15	0,3081	0,3220	0,0059
	24	20,1	0,84	0,0093	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	16	0,3803	0,3947	0,0052
	26	20,7	0,80	0,0107	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	2	0,1873	12	0,2727	0,4757	0,0049
	16	17,0	1,06	0,0043	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	11	0,1367	0,1511	0,0101
	18	17,9	0,99	0,0055	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	13	0,1885	0,2004	0,0064
	20	18,7	0,94	0,0067	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	14	0,2442	0,2573	0,0064
11	22	19,4	0,88	0,0079	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	15	0,3081	0,3220	0,0059
	24	20,1	0,84	0,0093	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	16	0,3803	0,3947	0,0052
	26	20,7	0,80	0,0107	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	2	0,1873	12	0,2727	0,4757	0,0049
	28	21,3	0,76	0,0122	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	1	0,1600	15	0,3875	0,5650	0,0053
	30	21,8	0,73	0,0138	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	3	0,4126	11	0,2319	0,6628	0,0046

em que: t – idade, em anos; d – classe de diâmetro à altura do peito (cm); h – altura (m); h/d – relação entre a altura e o diâmetro à altura do peito (DAP); v_{toco} – volume do toco, considerando a altura de corte de 10 cm (m³); n – número de toras por sortimento; m³ - volume em metros cúbicos por sortimento; S1 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 49 cm, e 4,6 m de comprimento; S2 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 39 cm, e 3,7 m de comprimento; S3 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 29 cm, e 2,4 m de comprimento; S4 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 19 cm, e 2,4 m de comprimento; S5 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 7 cm, e 1,0 m de comprimento; Resíduo – em m³.

Fonte: o autor.

APÊNDICE R – MAXIMIZAÇÃO DA RECEITA DOS SORTIMENTOS PARA *Tectona grandis* L.f. PELO MODELO DE CLARK III ET AL. (1991), COM EFEITO MISTO, CORTE RASO AOS 16 ANOS PARA OS SÍTIOS DE 17, 21 E 25 METROS, REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO

IS	d	h	h/d	V _{toco}	S1		S2		S3		S4		S5		V _{total}	Resíduo
					n	m ³	n	m ³	n	m ³	n	m ³	n	m ³		
17	22	17,9	0,81	0,0068	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	1	0,0948	11	0,1768	0,2853	0,0069
	24	18,5	0,77	0,0080	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	1	0,1132	12	0,2237	0,3508	0,0060
	26	19,1	0,74	0,0093	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	2	0,2198	10	0,1871	0,4239	0,0076
	28	19,7	0,70	0,0106	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	3	0,3383	9	0,1513	0,5046	0,0043
	30	20,2	0,67	0,0121	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	3	0,3906	9	0,1832	0,5931	0,0072
21	24	20,1	0,84	0,0093	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	2	0,1964	11	0,1831	0,3947	0,0060
	26	20,7	0,80	0,0107	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	3	0,3070	9	0,1502	0,4757	0,0076
	28	21,3	0,76	0,0122	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	3	0,3579	10	0,1887	0,5650	0,0062
	30	21,8	0,73	0,0138	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	4	0,4968	8	0,1449	0,6628	0,0074
	32	22,3	0,70	0,0155	0	0,0000	0	0,0000	1	0,2104	3	0,3581	9	0,1800	0,7694	0,0054
	34	22,8	0,67	0,0172	0	0,0000	0	0,0000	1	0,2371	4	0,4970	7	0,1275	0,8850	0,0062
	36	23,2	0,64	0,0189	0	0,0000	0	0,0000	2	0,4469	3	0,3818	8	0,1579	1,0096	0,0041
	38	23,6	0,62	0,0207	0	0,0000	0	0,0000	3	0,6691	3	0,3488	6	0,1005	1,1436	0,0045
25	26	22,6	0,87	0,0123	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	3	0,3274	11	0,1959	0,5419	0,0063
	28	23,2	0,83	0,0140	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	4	0,4616	9	0,1586	0,6420	0,0078
	30	23,7	0,79	0,0158	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	4	0,5323	10	0,1973	0,7515	0,0061
	32	24,2	0,76	0,0176	0	0,0000	0	0,0000	1	0,2210	4	0,4758	8	0,1492	0,8706	0,0072
	34	24,7	0,73	0,0195	0	0,0000	0	0,0000	1	0,2486	5	0,6222	6	0,1011	0,9996	0,0082
	36	25,1	0,70	0,0215	0	0,0000	0	0,0000	2	0,4692	4	0,5143	7	0,1278	1,1385	0,0058
38	25,5	0,67	0,0235	0	0,0000	0	0,0000	3	0,7068	3	0,3964	8	0,1572	1,2877	0,0037	

em que: IS – índice de sítio (m); d – classe de diâmetro à altura do peito (cm); h – altura (m); h/d – relação entre a altura e o diâmetro à altura do peito (DAP); V_{toco} – volume do toco, considerando a altura de corte de 10 cm (m³); n – número de toras por sortimento; m³ - volume em metros cúbicos por sortimento; S1 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 49 cm, e 4,6 m de comprimento; S2 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 39 cm, e 3,7 m de comprimento; S3 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 29 cm, e 2,4 m de comprimento; S4 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 19 cm, e 2,4 m de comprimento; S5 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 7 cm, e 1,0 m de comprimento; Resíduo – em m³.

Fonte: o autor.

APÊNDICE S – MAXIMIZAÇÃO DO VOLUME DOS SORTIMENTOS PARA *Tectona grandis* L.f. PELO MODELO DE CLARK III ET AL. (1991), COM EFEITO MISTO, CORTE RASO AOS 16 ANOS PARA OS SÍTIOS DE 17, 21 E 25 METROS, REGIÃO CENTRO-SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO

IS	d	h	h/d	V _{toco}	S1		S2		S3		S4		S5		V _{total}	Resíduo
					n	m ³	n	m ³	n	m ³	n	m ³	n	m ³		
17	22	17,9	0,81	0,0068	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	1	0,0948	11	0,1768	0,2853	0,0069
	24	18,5	0,77	0,0080	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	1	0,1132	12	0,2237	0,3508	0,0060
	26	19,1	0,74	0,0093	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	1	0,0980	13	0,3118	0,4239	0,0048
	28	19,7	0,70	0,0106	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	3	0,3383	9	0,1513	0,5046	0,0043
	30	20,2	0,67	0,0121	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	2	0,2950	12	0,2816	0,5931	0,0044
21	24	20,1	0,84	0,0093	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	16	0,3803	0,3947	0,0052
	26	20,7	0,80	0,0107	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	2	0,1873	12	0,2727	0,4757	0,0049
	28	21,3	0,76	0,0122	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	1	0,1600	15	0,3875	0,5650	0,0053
	30	21,8	0,73	0,0138	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	3	0,4126	11	0,2319	0,6628	0,0046
	32	22,3	0,70	0,0155	0	0,0000	0	0,0000	1	0,2104	1	0,1395	14	0,3995	0,7694	0,0046
	34	22,8	0,67	0,0172	0	0,0000	0	0,0000	1	0,2371	0	0,0000	17	0,6263	0,8850	0,0044
	36	23,2	0,64	0,0189	0	0,0000	0	0,0000	1	0,2577	4	0,5710	8	0,1579	1,0096	0,0041
	38	23,6	0,62	0,0207	0	0,0000	0	0,0000	3	0,6691	1	0,0816	11	0,3685	1,1436	0,0037
25	26	22,6	0,87	0,0123	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	1	0,1472	16	0,3769	0,5419	0,0055
	28	23,2	0,83	0,0140	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	3	0,3808	12	0,2421	0,6420	0,0051
	30	23,7	0,79	0,0158	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	20	0,7313	0,7515	0,0045
	32	24,2	0,76	0,0176	0	0,0000	0	0,0000	1	0,2210	3	0,3872	11	0,2405	0,8706	0,0045
	34	24,7	0,73	0,0195	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	3	0,4700	14	0,5058	0,9996	0,0043
	36	25,1	0,70	0,0215	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000	2	0,3965	17	0,7165	1,1385	0,0040
	38	25,5	0,67	0,0235	0	0,0000	0	0,0000	2	0,3984	4	0,6324	8	0,2297	1,2877	0,0037

em que: IS – índice de sítio (m); d – classe de diâmetro à altura do peito (cm); h – altura (m); h/d – relação entre a altura e o diâmetro à altura do peito (DAP); V_{toco} – volume do toco, considerando a altura de corte de 10 cm (m³); n – número de toras por sortimento; m³ - volume em metros cúbicos por sortimento; S1 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 49 cm, e 4,6 m de comprimento; S2 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 39 cm, e 3,7 m de comprimento; S3 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 29 cm, e 2,4 m de comprimento; S4 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 19 cm, e 2,4 m de comprimento; S5 – sortimento considerando diâmetro na ponta fina superior ou igual à 7 cm, e 1,0 m de comprimento; Resíduo – em m³.

Fonte: o autor.