



GABRIELA CRISTINA COSTA SILVA

**MODELAGEM DO CRESCIMENTO E DA
PRODUÇÃO FLORESTAL EM POVOAMENTOS
DE EUCALIPTO DESBASTADO E NÃO
DESBASTADO**

LAVRAS – MG

2017

GABRIELA CRISTINA COSTA SILVA

**MODELAGEM DO CRESCIMENTO E DA PRODUÇÃO FLORESTAL
EM POVOAMENTOS DE EUCALIPTO DESBASTADO E NÃO
DESBASTADO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Manejo Florestal, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Natalino Calegario, PhD
Orientador

Dr. Hélio Garcia Leite
Coorientador

**LAVRAS – MG
2017**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Silva, Gabriela Cristina Costa.

Modelagem do crescimento e da produção florestal em
povoamentos de eucalipto desbastado e não desbastado / Gabriela
Cristina Costa Silva. - 2017.

129 p.

Orientador: Natalino Calegario.

Coorientador: Hélio Garcia Leite.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2017.

Bibliografia.

1. Índice de sítio. 2. Dados longitudinais. 3. Clutter. I.
Calegario, Natalino. II. Leite, Hélio Garcia. III. Título.

GABRIELA CRISTINA COSTA SILVA

**MODELAGEM DO CRESCIMENTO E DA PRODUÇÃO FLORESTAL
EM POVOAMENTOS DE EUCALIPTO DESBASTADO E NÃO
DESBASTADO**

***GROWTH AND YIELD MODELLING IN EUCALYPTUS STANDS
SUBMITTED AND NOT SUBMITTED TO THINNING***

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Manejo Florestal, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 20 de fevereiro de 2017.

Prof. Dr. Fausto Weimar Acerbi Júnior UFLA

Prof. Dr. Hélio Garcia Leite UFV

Prof. Natalino Calegario, PhD
Orientador

LAVRAS – MG

2017

*Aos meus pais, Marlene e José, e aos meus irmãos Daniel e Camila,
por todo apoio e carinho durante essa minha jornada.*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar sempre presente em minha vida, me protegendo e guiando meus passos, por depositar em mim muito amor, confiança e saúde, possibilitando a realização de mais uma conquista.

Aos meus pais, José e Marlene, e aos meus irmãos Camila e Daniel, pelo amor incondicional, paciência, dedicação, companheirismo e exemplo de vida, sempre me impulsionando a realizar os meus sonhos e me incentivando a seguir em frente. Vocês são essenciais em minha vida!

Aos meus familiares, por todo apoio e carinho.

Às amigas/irmãs Fernanda, Taiane e Ximena, por terem se tornado minha segunda família em Lavras, por todos os momentos vivenciados na República M4, pelo companheirismo, conselhos, inúmeras gargalhadas, amizade e força, tornando essa caminhada mais leve e divertida.

Às amigas do manejo, Rafaella, Paula e Marya Eduarda, pela ajuda, momentos de diversão e horas de estudo compartilhadas.

Aos amigos e companheiros de orientação, Cainã, Elliezer, Isaac, Joyce, Mário, Mírian, Pedro, Poliane, Rafael, Tatiane, Thomaz e Ulisses, pelo ótimo convívio, e por toda ajuda e amizade.

A todos os amigos de Lavras, que compartilharam diversos momentos ao meu lado.

Às moradoras da R.B.O., Laura, Camila e Raíssa, pela acolhida durante o tempo que passei em Viçosa, pela paciência, carinho e momentos de diversão.

Ao professor orientador e amigo Natalino Calegario, pela oportunidade, confiança, pelos ensinamentos e conselhos, me incentivando a buscar novos e aprofundados conhecimentos para o meu crescimento pessoal e profissional.

Ao professor coorientador e amigo Hélio Garcia Leite, pela grande ajuda e contribuição na realização deste trabalho, pela confiança, oportunidade,

disponibilidade, por todos os ensinamentos, e por me acolher tão bem durante os trabalhos na UFV.

Aos funcionários do DCF, em especial à Chica, Nice e Juliano, por toda a ajuda e pelas agradáveis conversas.

À Universidade Federal de Lavras, a todos os professores do programa de Pós-graduação em Ciências Florestais e aos professores do Departamento de Ciências Exatas, por contribuírem com o meu aprendizado e formação profissional.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

MUITO OBRIGADA!!!

RESUMO GERAL

Técnicas que forneçam informações acerca da capacidade produtiva do local, e a predição ou projeção do crescimento e produção são essenciais para o manejo florestal. Esta estimativa é obtida por meio dos modelos de crescimento e produção, fundamentais para o planejamento florestal. Portanto, a utilização de modelos que apresentem adequada relação funcional e flexibilidade resulta em eficiência na modelagem. Demandas por toras de maior diâmetro e qualidade exigem o uso de métodos de manejo que conduzam o povoamento em ciclos mais rápidos, e que promovam maior incremento, reduzindo a pressão sobre as florestas nativas e agregando maior valor ao produto final. Com isso, o desbaste e a desrama artificial são técnicas que permitem a obtenção de madeira com essas características. Nesse contexto, o objetivo desse trabalho foi realizar a classificação da capacidade produtiva dos povoamentos, a partir da qual, foram gerados os ajustes do sistema de equações de Clutter (1963), buscando a forma do modelo volumétrico, mais adequada para estimar o crescimento e a produção de povoamentos de eucalipto desbastado e não desbastado. A classificação da capacidade produtiva foi realizada por meio do método da curva-guia, para as duas bases de dados, e foi feita uma análise da trajetória longitudinal dos dados, somente na base de dados não desbastada. A seleção do modelo de Clutter foi realizada por meio do ajuste em dois estágios, de 57 relações funcionais possíveis, e o teste deste modelo modificado a partir da interpretação dos parâmetros, para selecionar a forma do modelo volumétrico mais adequada. O modelo de Chapman-Richards foi o que melhor se ajustou às duas bases de dados para a classificação da capacidade produtiva, sendo que o desbaste por baixo, não afeta o crescimento em altura dominante. Ao utilizar o modelo de Clutter (1963) selecionado, houve ganho em precisão das estimativas para as duas bases de dados, assim como o modelo modificado, comprovando a importância em sempre verificar a forma do modelo volumétrico de Clutter, que seja mais adequada e que apresente consistência biológica para realizar a projeção do crescimento e da produção florestal de povoamentos de eucalipto desbastado e não desbastado.

Palavras-chave: Índice de sítio. Dados longitudinais. Sistema de equações. Clutter

GENERAL ABSTRACT

Techniques that provide information about the site quality and the prediction of growth and yield are essential for forest management. This estimate is obtained through the growth and yield models, fundamental for forest planning. Therefore, the use of models with adequate functional relationship and flexibility results in modeling efficiency. Demands for logs of greater diameter and quality require the use of management methods that lead to faster cycles and that promote greater increment, reducing the pressure on the native forests and adding more value to the final product. Thus, thinning and pruning are techniques that allow wood to be obtained with these characteristics. In this context, the objective of this work was to perform the classification of the site quality stands, from which, the Clutter system of equations (1963) were fitted, seeking the most adequate form of volumetric model to estimate the growth and yield of *Eucalyptus* plantations, submitted and not submitted to thinning. The site quality was performed by the guide curve method for the two databases, and an analysis of the longitudinal trajectory data in the unthinned database was made. The selection of the Clutter model was performed by two-stage adjustment of 57 possible functional relationships and the analysis of the model modified from the interpretation of the parameters to select the most suitable volumetric model form. The Chapman-Richards model was the one that best fit the two databases for the classification of productive capacity, and the thinning down does not affect the growth in dominant height. Using the selected Clutter (1963) model, there was a gain in precision of the estimates for the two databases, as well as the modified model, proving the importance in always verifying the form of the Clutter volumetric model that is more adequate and Biological consistent to carry out the projection of the growth and yield of thinned and unthinned eucalyptus plantations.

Keywords: Site index. Longitudinal databases. System of equations. Clutter.

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO 1

- Figura 1 - Curvas de índices de local e dispersão das alturas dominantes observadas para os modelos ajustados na base de dados do povoamento de eucalipto não desbastado. Em que: LS e LI (limite superior e inferior); I, II, III (sítios I, II e III).57
- Figura 2 - Dispersão dos erros relativos percentuaos em função da idade para os modelos ajustados na base de dados do povoamento de eucalipto não desbastado.58
- Figura 3 - Porcentagem de parcelas pertencentes a cada classe de acordo com a classificação das equações analisadas.....60
- Figura 4 - Tendência dos valores de índices de local para diferentes produtividades para o povoamento de eucalipto não desbastado.63
- Figura 5 - Curvas de índices de local e dispersão das alturas dominantes observadas para os modelos ajustados na base de dados do povoamento de eucalipto desbastado. Em que: LS e LI (limite superior e inferior); I, II, III (sítios I, II e III).65
- Figura 6 - Dispersão dos erros relativos percentuais em função da idade para os modelos ajustados na base de dados do povoamento de eucalipto submetido a desbastes.66
- Figura 7 - Porcentagem de parcelas pertencentes a cada classe de acordo com a classificação das equações analisadas.....68
- Figura 8 - Comportamento da altura dominante e do índice de sítio (S) no decorrer do tempo para o povoamento de eucalipto submetido a desbaste.69
- Figura 9 - Curvas geradas pelos 4 modelos ajustados para cada grupo.73

Figura 10 - Trajetória das parcelas por grupo para o ajuste anamórfico e polimórfico.....	75
Figura 11 - Definição das classes de sítio para o ajuste polimórfico a partir da altura dominante na idade de referência (7 anos). LI (limite inferior), LS (limite superior).	77

ARTIGO 2

Figura 1 - Dispersão dos erros relativos percentuais em função do volume estimado e da idade para os modelos ajustados na base de dados do povoamento de eucalipto não desbastado modelo completo (a); modelo selecionado (b); modelo usual (c) e modelo modificado (d).....	100
Figura 2 - Produções observadas e estimadas pelos sistemas para os modelos ajustados na base de dados do povoamento de eucalipto não desbastado, modelo completo (a); modelo selecionado (b); modelo usual (c) e modelo modificado (d).....	102
Figura 3 - Histograma de frequência dos erros relativos percentuais dos modelos volumétricos ajustados na base de dados do povoamento de eucalipto não desbastado. Modelo completo (a); modelo selecionado (b); modelo usual (c) e modelo modificado (d).....	103
Figura 4 - Gráficos das Curvas de produção e de Incremento Médio e Corrente anual para os quatro sistemas ajustados na base de dados do povoamento de eucalipto não desbastado. Modelo completo (a); modelo selecionado (b); modelo usual (c) e modelo modificado (d).....	106
Figura 5 - Gráficos de dispersão dos resíduos em função da área basal estimada e da idade e gráfico de correlação entre as áreas	

	basais estimadas e observadas na base de dados do povoamento de eucalipto não desbastado para os modelos completo, selecionado e usual (a) e para o modelo modificado (b).....	108
Figura 6 -	Gráficos de dispersão dos resíduos e correlação entre as produtividades observadas e estimadas para os testes dos quatro modelos ajustados na base de dados do povoamento de eucalipto não desbastado. Modelo completo (a); modelo selecionado (b); modelo usual (c) e modelo modificado (d).	111
Figura 7 -	Dispersão dos erros relativos percentuais em função do volume estimado e da idade para os modelos ajustados na base de dados do povoamento de eucalipto desbastado. Modelo completo (a); modelo selecionado (b); modelo usual (c) e modelo modificado (d).....	115
Figura 8 -	Correlação entre as produções observadas e estimadas para os modelos ajustados na base de dados do povoamento de eucalipto desbastado. Modelo completo (a); modelo selecionado (b); modelo usual (c) e modelo modificado (d).....	116
Figura 9 -	Histograma de frequência dos erros relativos percentuais dos modelos volumétricos ajustados na base de dados do povoamento de eucalipto desbastado. Modelo completo (a); modelo selecionado (b); modelo usual (c), modelo modificado (d).....	118
Figura 10 -	Gráficos de dispersão dos resíduos em função da área basal estimada (1) e da idade (2) e gráfico de correlação entre as áreas basais estimadas e observadas (3) para os modelos completo, selecionado e usual (a) e para o modelo modificado (b) ajustados para a bse de dados com desbaste.....	120

Figura 11 Gráficos de dispersão dos resíduos e correlação entre as produtividades observadas e estimadas para o teste dos três modelos ajustados na base de dados do povoamento de eucalipto desbastado. Modelo completo (a); modelo selecionado (b); modelo usual (c) e modelo modificado (d).122

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 1

- Tabela 1 - Modelos testados para estimação da altura média dominante e codominante e classificação da capacidade produtiva para os povoamentos de eucalipto com e sem aplicação de desbaste por baixo.....49
- Tabela 2 - Estimativas dos parâmetros e correspondentes estatísticas obtidas nos ajustes dos modelos aos dados do povoamento não desbastado.....55
- Tabela 3 - Número de parcelas abrangidas pelas curvas em todo o decorrer do tempo (absoluto e relativo), valor da estabilidade, e número de parcelas por classe (absoluto e relativo) para cada equação ajustada para o povoamento não desbastado.....60
- Tabela 4 - Parâmetros e estatísticas obtidos nos ajustes dos modelos do povoamento de eucalipto submetido a desbastes.64
- Tabela 5 - Número de parcelas abrangidas pelas curvas em todo o decorrer do tempo (absoluto e percentual), valor da estabilidade, e número de parcelas (absoluto e percentual) para cada equação ajustada para o povoamento desbastado.....67
- Tabela 6 - Suficiência amostral para representar as parcelas pertencentes a cada grupo para gerar a análise do morfismo dos dados, considerando um erro admissível igual a 5%.....70
- Tabela 7 - Parâmetros ajustados utilizando o modelo de Schumacher para os quatro grupos de altura dominante considerados.....70
- Tabela 8 - Valor calculado da estatística Z comparando os parâmetros β_0 e β_1 entre todos os grupos.....71
- Tabela 9 - Intervalo de classe obtidos para os grupos.77

ARTIGO 2

Tabela 1 - Resultado do teste de Hausman (1978) e p-valor para os quatro modelos analisados para os povoamentos desbastado e não desbastado.....	97
Tabela 2 - Estimativas dos parâmetros dos modelos de volume completo, selecionado, usual e modificado associados aos valores de probabilidade de significância (p-valor) e a estatística erro padrão percentual (Sy.x%) para o povoamento de eucalipto não desbastado.....	98
Tabela 3 - Tabelas de produção para os três sistemas ajustados na base de dados do povoamento de eucalipto não desbastado.	105
Tabela 4 - Estimativas dos parâmetros do modelo de área basal para os quatro sistemas associados aos valores de probabilidade de significância (p-valor) e a estatística erro padrão percentual (Sy.x%) para o povoamento de eucalipto não desbastado.	107
Tabela 5 - Estimativas dos parâmetros dos modelos de volume associados aos valores de probabilidade de significância (p-valor) e a estatística erro padrão percentual dos modelos volumétricos para o povoamento de eucalipto desbastado.....	113
Tabela 6 - Estimativas dos parâmetros do modelo de área basal para os quatro sistemas, associados aos valores de probabilidade de significância (p-valor) e a estatística erro padrão percentual (Sy.x%) para o povoamento de eucalipto desbastado.	119

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE.....	17
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
2.1 Classificação de sítio.....	19
2.2 Crescimento e produção florestal.....	20
2.3 Desbaste.....	23
2.4 Aplicação do modelo de Clutter.....	25
2.5 Sistema de equações.....	29
2.6 Ajuste em dois estágios.....	32
REFERÊNCIAS.....	35
SEGUNDA PARTE – ARTIGOS.....	41
ARTIGO 1 - SELEÇÃO DE MODELO PARA CONSTRUÇÃO DE CURVAS DE ÍNDICE DE LOCAL EM POVOAMENTOS DE EUCALIPTO DESBASTADO E NÃO DESBASTADO.....	41
1 INTRODUÇÃO.....	45
2 METODOLOGIA.....	47
2.1 Descrição dos dados.....	47
2.2 Classificação da capacidade produtiva.....	48
2.3 Análise estatística das estimativas de Hdc.....	49
2.4 Classificação da capacidade produtiva pela modelagem da trajetória longitudinal dos dados de altura média dominante e codominante.....	51
2.5 Definição da amplitude de classe para o ajuste polimórfico.....	52
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
3.1 Povoamento não desbastado.....	55
3.2 Povoamento desbastado.....	63
3.3 Classificação pela modelagem da trajetória longitudinal dos dados.....	69
3.4 Definição da amplitude de classe para o ajuste da trajetória longitudinal dos dados.....	76
4 CONCLUSÕES.....	79
REFERÊNCIAS.....	81
ARTIGO 2 - EMPREGO DO MODELO DE CLUTTER PARA PROGNOSE DO CRESCIMENTO E PRODUÇÃO EM POVOAMENTOS DE EUCALIPTO DESBASTADO E NÃO DESBASTADO.....	85
1 INTRODUÇÃO.....	89
2 METODOLOGIA.....	91

2.1	Descrição dos dados	91
2.2	Ajuste da relação funcional de Clutter.....	92
2.3	Avaliação dos sistemas.....	95
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	97
3.1	Povoamento não desbastado.....	97
3.2	Povoamento desbastado.....	111
4	CONCLUSÕES	125
	REFERÊNCIAS	127

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO GERAL

Na gestão florestal, a classificação de terras e a predição, ou projeção, do crescimento e da produção são essenciais para o manejo florestal. Esta estimativa é obtida por meio dos modelos de crescimento e produção, que servem para atualizar os dados de inventário florestal, construir tabelas de produção, prescrever tratamentos silviculturais e estimar estoques de crescimento e de colheita (BEZERRA, 2009). Portanto, a utilização de modelos que apresentem relação funcional adequada resulta em eficiência na modelagem.

É notória a existência de grande diversidade na produção madeireira do Brasil. No entanto, as destinações das florestas produtivas brasileiras são, em sua grande maioria, voltadas para o fornecimento de matéria-prima para indústrias produtoras de pasta celulósica e geração de energia. Outras demandas também precisam ser supridas e devem merecer atenção especial para o desenvolvimento de técnicas que visem boa condução do povoamento, em ciclos mais rápidos, que resultem em produtos de boa qualidade e que exigem toras de maior dimensão.

Diante da demanda por toras de maior diâmetro, existe a necessidade de técnicas de manejo que, na condução do povoamento, promovam tal incremento, reduzindo a pressão sobre as florestas nativas que a cada dia estão mais limitadas, em função da escassez e da legislação vigente (CAMPOS; LEITE, 2013).

Nesse contexto, pode-se citar a produção de madeira voltada para outros fins, como serraria e indústrias moveleiras. Em tal caso, algumas técnicas silviculturais, como desbaste e desrama artificial, são necessárias para se

produzir madeira com essas finalidades. O desbaste consiste na retirada de algumas árvores do povoamento, geralmente as de menor qualidade ou de forma sistemática, buscando aumentar o espaço de crescimento das árvores remanescentes, assim como a disponibilidade de luz e nutrientes, resultando em árvores de maiores dimensões e, conseqüentemente, maior valor comercial. Tais idades são definidas por critérios econômicos ou silviculturais e estimadas por meio da modelagem do crescimento em área basal e volume e diagrama de densidade.

Em trabalhos já desenvolvidos utilizando o modelo de Clutter (1963), foi comprovado que o seu desempenho pode variar para diferentes cenários, o que confirma a necessidade de se obter melhores ajustes com outras relações funcionais a partir desse modelo.

Conforme exposto, decisões sobre desbaste, em especial sobre a idade de aplicação, dependem da eficiência do modelo de crescimento e produção utilizado. O modelo mais usual é o de Clutter (1963). Segundo Campos e Leite (2013), trata-se de um modelo compatível, ou seja, a integral da equação de crescimento resulta na equação de produção, e a derivada desta, resulta na equação de crescimento. O fato do cálculo do volume ser realizado de forma direta o torna explícito, e sua consistência é devido à flexibilidade das projeções, pois a área basal pode ser projetada anualmente, ou com intervalos irregulares entre os anos.

Sendo assim, o objetivo desse trabalho foi realizar a classificação da capacidade produtiva dos povoamentos, a partir da qual, foram gerados os ajustes do sistema de equações de Clutter (1963), buscando a forma do modelo volumétrico mais adequado para estimar o crescimento e a produção de povoamentos de eucalipto com e sem desbaste.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Classificação de sítio

Dentre os fatores considerados para prognosticar o crescimento e a produção florestal, a capacidade produtiva do local tem forte influência nos métodos de projeção (CLUTTER et al., 1983), e deve, portanto, ser estimada de forma precisa e consistente.

Sua quantificação é importante para o planejamento florestal, visto que influencia a dimensão dos produtos, viabilizando economicamente projetos florestais (CUNHA NETO et al., 1996), ou seja, esta análise permite verificar os riscos do empreendimento.

A capacidade produtiva de um local pode ser definida por muitos métodos, fundamentados em características edáficas, climáticas, fisiográficas ou no crescimento das árvores. Este último é o mais utilizado pelos engenheiros florestais, baseando-se na altura média das árvores dominantes e codominantes, por se tratar de uma medida mais prática e eficiente para estimar a produtividade, além de ser uma variável não afetada por tratamentos silviculturais (MACHADO et al. 1997). Cabe ressaltar, que esta é uma medida quantitativa da qualidade do sítio, dessa forma ela se torna mais usual para a modelagem e predição do crescimento florestal.

Segundo Batho e Garcia (2006), a proposta de uso da altura para avaliar a qualidade do local foi sugerida primeiramente por Remy de Perthuis de Laillevault, na segunda metade do século XVIII, ao constatar que o alongamento anual dos ramos verticais em rebrota apresentou grandes diferenças em diferentes sítios.

Os métodos mais utilizados consideram a relação funcional entre a variável dependente altura média das árvores dominantes e codominantes, e a variável independente idade para estimar a capacidade produtiva do sítio, que é representada pelas curvas de índice de local (CAMPOS; LEITE, 2013). O índice de local consiste na média das alturas dominantes e codominantes do povoamento em uma determinada idade de referência (BURKHART; TOMÉ, 2012).

Clutter et al. (1983) destacam que muitos profissionais se enganam ao acreditar que o objetivo do índice de sítio é prever a altura do povoamento na idade de referência. De fato, o objetivo é selecionar o padrão de desenvolvimento em altura esperado para o povoamento no restante de sua vida.

2.2 Crescimento e produção florestal

A projeção, ou prognose, do crescimento e da produção da floresta é um dos principais elementos do manejo florestal, uma vez que se faz necessário compreender estes processos para a boa gestão dos povoamentos (CAMPOS; LEITE, 2013). Trata-se de uma ferramenta capaz de auxiliar em muitos aspectos, como prever os rendimentos futuros e explorar opções de silvicultura (VANCLAY, 1994). Assim sendo, diante da importância dessa técnica, as tomadas de decisão do manejo florestal, têm sido cada vez mais efetuadas a partir de modelos matemáticos/estatísticos (MAESTRI; SANQUETTA; ARCE, 2003).

Nesse contexto, Vanclay (1994) descreve o crescimento como o processo de aumento das dimensões de um ou mais indivíduos por determinado período de tempo, já a produção está relacionada às dimensões finais, no final de certo período.

Clutter et al. (1983) relatam que, a princípio, as predições volumétricas por unidade de área eram definidas por tabelas de produção, a partir da combinação das variáveis idade, sítio e densidade do povoamento. Contudo, a maior parte das predições são atualmente obtidas por equações matemáticas. Estas equações são denominadas modelos de crescimento e produção, que podem englobar mais de uma equação, contendo uma ou mais variáveis independentes (CAMPOS; LEITE, 2013).

Os estudos em modelagem do crescimento e produção datam desde o século XVIII. Mackinney, Schumacher e Chaiken (1937) utilizaram técnicas de regressão múltipla para desenvolver equações de predição da produção de densidade variável, tendo como variáveis independentes, o sítio, a idade, a densidade, e um índice de composição do povoamento. Em seguida, Schumacher (1939) construiu um tipo de curva de crescimento aplicável à produção de madeira para todo o povoamento florestal. Além disso, esse autor desenvolveu um modelo volumétrico, baseado em equações diferenciais, contendo as variáveis independentes, idade, sítio e densidade.

De acordo com Silva, Campos e Leite (2006), os primeiros pesquisadores a explicarem matematicamente a relação entre o crescimento e a produção florestal foram Buckman (1962) e Clutter (1963), percebendo que a forma algébrica do modelo de produção poderia ser obtida pela integral do modelo de crescimento. Clutter (1963) obteve essa relação ao aperfeiçoar o modelo de Schumacher (1939), combinando um modelo de crescimento e produção com outro de densidade variável, caracterizando importante progresso da modelagem.

A partir daí, muitos outros estudos foram conduzidos sobre o crescimento e produção, dentre os quais pode-se citar: Vanclay (1994), Oliveira (1995), Arce et al. (1998), Calegario et al. (2005), Carvalho (2010), Retslaff et

al. (2012), Wolff II (2012), Castro et al. (2013), Machado et al. (2014), Melo (2014), dentre outros.

Clutter et al. (1983) definiram os modelos de crescimento e produção em diferentes classificações, de acordo com a complexidade da abordagem matemática envolvida: modelos na forma tabular e modelos de equações e sistemas de equações. Estes últimos, subdivididos em três abordagens: modelos de distribuição de diâmetros, os quais estimam o número de árvores por classe de diâmetro; modelos em nível de árvores individuais, os quais abordam características específicas de cada indivíduo; e os modelos em nível de povoamento.

Os modelos baseados em estatísticas de regressão são os mais usuais na modelagem do crescimento e produção florestal (CARVALHO, 2010). Estes englobam erros associados, que expressam as variações não controláveis das estimativas e, portanto, a precisão do modelo utilizado, o que os torna probabilísticos (OLIVEIRA, 2012).

Deste modo, os modelos globais, ou em nível de povoamento, são assim denominados, pois os parâmetros do povoamento são a unidade básica de modelagem, como área basal, capacidade produtiva e idade, estimando o volume por unidade de área (VANCLAY, 1994). Modelos de densidade variável e dos tipos normais e empíricos são os principais representantes desse tipo de modelo (CAMPOS; LEITE, 2013).

Segundo Dias et al. (2005), modelos com essa abordagem são os mais utilizados no Brasil, especialmente o de Clutter (1963), por se tratar de um modelo menos complexo, e por atender a produção de madeira de uso único (celulose ou carvão vegetal).

Segundo Campos e Leite (2013), os principais modelos globais são os desenvolvidos por Schumacher (1939), Buckman (1962) e Clutter (1963), além das funções Logística, Gompertz e Richards.

Clutter et al. (1983) ressaltam que os tipos de dados necessários variam amplamente: equações de predição direta, que podem ser desenvolvidas utilizando dados do inventário florestal em parcelas temporárias, equações que predizem o crescimento implicitamente ou explicitamente, que necessitam de pelo menos uma remedição das parcelas, e os modelos que demandam maior quantidade de dados, como os modelos de árvore individual.

Além dos modelos apresentados, uma tendência são os modelos processuais. Ferreira (2009) explica que estes modelam as causas para prever o efeito (crescimento), sendo mais complexos que os modelos não processuais, os quais medem o efeito a partir das informações do inventário florestal e os tratam estatisticamente.

Outra tendência é a junção dos modelos não processuais com os modelos baseados em processo, também chamados de modelos híbridos. Makela et al. (2000) afirmam que essa relação é importante para que esses modelos sejam operacionais, uma vez que esse é o maior desafio, atualmente, para a aplicação dos modelos processuais. Ainda que existam muitas questões a serem estudadas, esses autores concluíram que o uso de variáveis do processo, relacionados à aquisição de carbono pelas árvores, para formulação de modelos de crescimento, é um mecanismo muito eficiente.

2.3 Desbaste

A densidade do povoamento é um dos principais fatores que influenciam a produção da floresta. Deste modo, no manejo florestal, os fatores que influenciam o crescimento devem ser considerados, visando o máximo aproveitamento da capacidade produtiva do local (SCHNEIDER et al., 1998). Os autores ressaltam que em densidades muito baixas, o povoamento pode não aproveitar todo o potencial do sítio, como água, luz e nutrientes disponíveis no

local. No entanto, estes elementos podem não ser suficientes para suprir povoamentos muito adensados, comprometendo o desenvolvimento das árvores.

O desbaste favorece o desenvolvimento das árvores, pois amplia o espaço vital destas, fazendo com que o desenvolvimento da copa e do sistema radicular se torne mais equilibrado (SCHNEIDER et al., 1998). Ou seja, esta técnica busca reduzir a competição, evitando que indivíduos menos aptos, quando se utiliza desbaste seletivo, utilizem os recursos do meio, favorecendo árvores que atingirão maiores dimensões, aumentando a rentabilidade do investimento (DIAS et al., 2005).

No planejamento do desbaste, fatores como tipo, intensidade e época devem ser determinados. Essa escolha pode variar em função dos objetivos do proprietário, disponibilidade de mercado, qualidade do povoamento e custos de colheita (ROLLINSON, 1987).

Segundo Simões (1981) existem dois métodos para aplicação do desbaste: seletivo e sistemático. No desbaste seletivo as árvores a serem retiradas do povoamento são marcadas de acordo com características preestabelecidas, em função do objetivo da produção, removendo sempre as árvores inferiores (dominadas ou defeituosas). O desbaste sistemático é realizado em povoamentos uniformes, ainda não submetidos a desbaste e que ainda não possuem diferenciação em classes de copas. Este segue um sistema predeterminado, que não faz distinção quanto à qualidade das árvores. O mais comum é a remoção de uma fileira, respeitando intervalos estabelecidos em função da intensidade (CAMPOS; LEITE, 2013).

Segundo Rollinson (1987), a intensidade do desbaste é a taxa de volume retirada da floresta. Sendo que, além do volume, esta pode ser determinada em função da área basal, como trabalho desenvolvido por Pienaar et al. (1985). Intensidades muito baixas de desbaste fazem com que o povoamento fique superestocado e, com o passar do tempo, a competição pode promover a morte

de algumas árvores, reduzindo a produção acumulada, a não ser que o espaçamento inicial seja muito alto. Taxas elevadas de desbaste também reduzem a produção, pois a abertura de espaço faz com que os indivíduos não consigam utilizar todos os recursos (ROLLINSON, 1987).

É importante considerar que o aumento do número de árvores por hectare, aumenta a área basal, ou seja, gera competição entre os indivíduos, devido à limitação dos recursos, como água e nutrientes, causando mortalidade natural, pois, com a redução da copa das árvores, haverá menor produção fotossintética (SCHNEIDER; FINGER, 1994).

Realizado adequadamente o desbaste, o crescimento das árvores é retomado até que ocorra uma nova redução no ritmo de crescimento, atingindo uma idade de estagnação, quando então será feito um novo desbaste ou o corte final da floresta (DIAS, 2000).

2.4 Aplicação do modelo de Clutter

Diante das muitas possibilidades de uso do modelo de Clutter, serão apresentados alguns dos trabalhos desenvolvidos no Brasil com a sua aplicação.

Soares et al. (1998) incluíram a variável climática precipitação anual defasada no modelo de área basal do sistema de equações, buscando melhorar as estimativas em locais com grande variação climática interanual. Esta alteração foi significativa para o modelo de área basal e apresentou consistência para o híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus Urophylla*. Este modelo foi aplicado, para este clone, por Soares e Leite (2000), na mesma região (Inhambupe - BA) e gerou estimativas de volume área basal para diferentes cenários climáticos.

Soares et al. (2004) propuseram uma modificação no modelo de Clutter, inserindo a variável altura média das árvores dominantes no modelo volumétrico usual, mantendo as propriedades de compatibilidade e consistência. O modelo

então passou a ser constituído por um sistema de três equações (B_2, V_2 e \bar{H}_2). Ao compará-lo com o modelo de Clutter, o novo sistema se mostrou mais eficiente, com uma pequena inconsistência na estimativa da idade técnica de corte.

Dias et. al. (2005) empregaram o modelo de Clutter para estimar a produtividade em povoamentos desbastados de eucalipto. O modelo foi eficiente para estimar a produção dos povoamentos de eucalipto submetidos a desbaste, porém, durante o ajuste do modelo, optou-se por retirar a variável sítio do modelo de área basal, por apresentar valor inconsistente no ajuste (negativo).

Santana et al. (2005) aplicaram o sistema de equações desenvolvido por Clutter para realizar a prognose do crescimento e produção de povoamentos de eucalipto não desbastados, auxiliando uma empresa no ordenamento florestal, em função da demanda para abastecimento de uma fábrica de papel.

Visando desenvolver equações para estimar o carbono presente no fuste de árvores de eucalipto, Soares, Leite e Gorgens (2005) utilizaram o modelo de Clutter como modelo de crescimento e produção para estimar o estoque de carbono futuro do fuste, gerando estimativas precisas. Neste trabalho a equação de área basal apresentou inconsistência no sinal do parâmetro associado ao sítio.

Gorgens et al. (2007), com o objetivo de desenvolver um modelo mais flexível para captar as tendências pré e pós-desbastes, propuseram uma modificação no modelo de Piennar e Shiver (1986). Seu comportamento foi comparado com o modelo de Clutter, ajustado para o mesmo fim. Com isso, os autores concluíram que o modelo desenvolvido apresentou estatísticas semelhantes ao modelo de Clutter, sem que ocorresse maior flexibilidade. Também observaram que o modelo de Clutter pode ser aplicado para simulação de desbaste, mesmo não diferenciando tendências de crescimento. Cabe ressaltar, que neste trabalho também houve inconsistência na estimativa do parâmetro da equação da área basal associado ao sítio. Portanto, os autores optaram por retirá-lo no ajuste.

Demolinari et al. (2007), visando analisar o comportamento das variáveis do povoamento ao longo do tempo (área basal, volume, altura, diâmetro médio quadrático e número de árvores por hectare) utilizaram o modelo de Clutter, para caracterizar tendências de crescimento dos povoamentos de eucalipto em volume e em área basal por hectare, em diferentes capacidades produtivas, para definir as idades técnicas de colheita (ITC) e as idades em que ocorreram as estagnações dos crescimentos em área basal por hectare e elaborar os gráficos mostrando as curvas de produção e as curvas de incremento corrente mensal (ICM) e de incremento médio mensal (IMM). O sistema de equações se ajustou bem aos dados, apresentando leve tendência de subestimativa em maiores volumes e área basal sem casca por hectare, além de uma leve tendência de superestimativa dos maiores volumes com casca.

O modelo de Clutter foi também utilizado como base de comparação com outro modelo alternativo para projeção do crescimento e produção de povoamentos de teca (*Tectona grandis*) por Cruz et al. (2008). Neste estudo, o modelo alternativo apresentou maior precisão em relação ao modelo de Clutter para povoamentos de teca com menos de 6 anos.

Salles et al. (2012) estudaram a melhor forma de ajuste do modelo de Clutter para estimar o crescimento e produção de clones de eucalipto, em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF). Neste estudo, os autores definiram uma forma do modelo para cada clone estudado, a partir da sua forma completa, observando sempre o valor do sinal dos parâmetros. Os autores ressaltaram que o modelo na sua forma completa é mais flexível e, portanto, deve ser ajustado a partir do modelo completo.

Castro et al. (2013) avaliaram e compararam duas categorias de modelos de crescimento e produção em plantios comerciais de eucalipto: um modelo do tipo povoamento total, sendo adotado o modelo de Clutter, e um modelo do tipo árvore individual utilizando Redes Neurais Artificiais (RNA). O sistema de

equações de Clutter estimou com precisão as áreas basais e os volumes futuros, apresentando leves tendências de sub e superestimativa na área basal. Os autores concluíram que ambos os modelos apresentaram consistência.

Mendonça et al. (2014) utilizaram o modelo de Clutter em comparação com o modelo logístico, com acréscimo de covariáveis, para estimar a produção de sortimentos de plantios clonais de eucalipto. Neste caso o modelo logístico foi mais eficiente para estimar a produção em volume de madeira para energia e celulose.

Miranda et al. (2014) aplicaram o modelo de Clutter para estimar o crescimento e produção de povoamentos de eucalipto, buscando verificar a influência da precipitação pluviométrica no crescimento e produção volumétrica da floresta. Para tal, o modelo foi ajustado para os dados com e sem estratificação em classes de precipitação. Este gerou resultados coerentes do ponto de vista estatístico e biológico, para as duas bases de dados. Também neste trabalho, o modelo de área basal do sistema de equações apresentou inconsistências. Nesse caso, os autores optaram por retirar a variável sítio e inserir a variável logaritmo neperiano da área basal inicial.

Nascimento et al. (2015) avaliaram o desempenho do modelo de Clutter para a projeção do crescimento e produção em povoamentos de *Pinus taeda* na região norte de Santa Catarina. Os autores concluíram que o modelo foi adequado e pode ser ajustado para estimar a produção de povoamentos de *Pinus* com ou sem desbaste.

Com o objetivo de avaliar dois métodos de classificação de sítio, Castro et al. (2015) utilizaram o modelo de Clutter para gerar a prognose do crescimento e produção florestal de plantios de eucalipto, utilizando as variáveis sítio para os dois métodos. Os ajustes do modelo foram precisos nas duas situações.

Com o objetivo de aplicar testes de identidade de modelos na comparação das curvas médias de capacidade produtiva e crescimento em área basal e volume, em seis fazendas de eucalipto numa região do estado de São Paulo, Roveda et al. (2016) aplicaram o modelo de Clutter para gerar a curva média de produção em volume e área basal, e o mesmo apresentou estimativas consistentes. Porém, os autores observaram a mesma inconsistência já ressaltada a respeito do parâmetro da equação de área basal, optando por substituir a variável sítio e inserir a variável logaritmo neperiano da área basal inicial.

A partir dos trabalhos apresentados, foi possível perceber que se trata de um modelo muito utilizado na engenharia florestal e, muitas vezes, como base de comparação com outros modelos ou métodos de projeção do crescimento e produção, o que o torna uma das grandes referências nos estudos de manejo florestal. Portanto, diante das muitas possibilidades de aplicação, o modelo ainda pode ser modificado e melhorado, começando pela busca de soluções para as inconsistências ressaltadas pelos autores acima.

2.5 Sistema de equações

O crescimento e produção em volume de povoamentos equiâneos são definidos por meio da idade, área basal e classificação da capacidade produtiva. A área basal representa a medida da densidade do povoamento que é obtida por meio da idade, qualidade de sítio e da área basal inicial. Estas relações funcionais formam um sistema de equações interdependentes que são obtidas simultaneamente (BURKHART; TOMÉ, 2012).

Em modelos constituídos por apenas uma equação, existe uma variável dependente (y) e uma ou mais variáveis explanatórias (x 's), com as quais é feita a estimativa do valor de y . Nesse caso, a relação de causa e efeito, se existir,

decorre dos valores de x para y , ou seja, de forma unidirecional (GUJARATI; PORTER, 2003).

Estes autores explicam que, em alguns casos, essa relação unidirecional não acontece, isto é, y é determinado pelos valores de x , mas uma ou mais dessas variáveis são estimadas por y , tornando-se um modelo bidirecional ou simultâneo. Com isso, é mais eficiente utilizar modelos de equações simultâneas, nos quais há uma equação para cada uma das variáveis mutuamente dependentes ou endógenas. Diferente das equações unidirecionais, no sistema de equações não é possível estimar os parâmetros de uma equação separadamente, sem considerar as informações fornecidas por outras equações no sistema.

Portanto, o método de mínimos quadrados ordinários, comumente utilizado para estimar separadamente os parâmetros das equações dentro de um sistema, pode levar a estimativas tendenciosas e inconsistentes (BURKHART; TOMÉ, 2012). Isto se deve à correlação presente entre as variáveis endógenas do sistema e os termos de erro (BORDERS, 1989).

Considerando como exemplo o modelo $y = \beta_0 + \beta_1 x + u$, em que x e u são correlacionados ($\text{Cov}(x, u) \neq 0$). Para obter estimativas consistentes dos parâmetros é necessário utilizar informações adicionais, chamadas variáveis instrumentais, que devem atender a certas propriedades. A primeira propriedade, chamando de z uma variável observável, é que z não seja correlacionada com u ($\text{Cov}(z, u) = 0$), e a segunda propriedade é que z seja correlacionada com x ($\text{Cov}(z, x) \neq 0$). Atendendo a esses princípios, diz-se que z é uma variável instrumental de x e exógena na equação (WOOLDRIDGE, 2011).

A relação de endogeneidade é muito comum em sistemas de equações. Como alternativa de ajuste para esses sistemas são indicados os métodos de ajuste em dois ou três estágios, que podem gerar estimativas consistentes e eficientes. Porém, é necessário verificar a presença de simultaneidade entre as equações, antes de descartar a aplicação do método de mínimos quadrados

ordinários, ou seja, verificar se uma variável independente é correlacionada com o erro. Uma das formas de avaliar essa relação é por meio do teste de Hausman (GUJARATI; PORTER, 2003).

Esse teste verifica a presença de endogeneidade nos modelos. Considerando, por exemplo o modelo $y = x'_i\beta + e_i$. Se existir a seguinte relação $E(x_i e_i) \neq 0$ implica na presença de endogeneidade (HANSEN, 2017). De acordo com Wooldridge (2011), o teste de Hausman (1978) é uma comparação direta das estimativas de mínimos quadrados ordinários e mínimos quadrados em dois estágios, e determina se as diferenças são estatisticamente significantes. O teste segue os seguintes passos: 1 – estimar a forma reduzida da variável endógena a ser testada, regredindo em função de todas as variáveis exógenas (instrumento), e obter os resíduos da regressão e; 2 – Estimar a equação estrutural (que inclui a variável endógena) por mínimos quadrados ordinários, utilizando os resíduos obtidos anteriormente como variável explicativa. Se o parâmetro associado ao resíduo for significativo, pelo teste χ^2 , conclui-se que a variável estudada é endógena e, portanto, pode-se aplicar a regressão em dois estágios.

O teste de hipótese de Hausman (1978) é dado por:

$$H = (\beta_{2SLS} - \beta_{OLS})' \{Var[\beta_{2SLS}] - Var[\beta_{OLS}]\}^{-1} (\beta_{2SLS} - \beta_{OLS}) \quad (1)$$

Em que: H = estatística Hausman; β_{2SLS} = Parâmetro estimado pelo método de mínimos quadrados em dois estágios; β_{OLS} = Parâmetro estimado pelo método de mínimos quadrados ordinários; $Var[\beta_{2SLS}]$ = Variância de β_{2SLS} ; $Var[\beta_{OLS}]$ = Variância de β_{OLS} .

2.6 Ajuste em dois estágios

Como já mencionado, com a presença de variável endógena no modelo, que é correlacionada com o erro, haverá violação dos pressupostos que devem ser atendidos para se aplicar o método dos mínimos quadrados ordinários (MQO) e, conseqüentemente, os estimadores serão viesados.

Para evitar que as estimativas dos parâmetros sejam inconsistentes, existem alguns métodos que podem ser utilizados no ajuste de equações simultâneas, quando detectada a presença de endogeneidade. Um desses métodos é o ajuste por mínimos quadrados em dois estágios (MQ2E).

Segundo Gujarati e Porter (2011) este método foi desenvolvido independentemente por Theil (1957) e Basmann (1953), e é assim denominado por se tratar da aplicação do MQO em duas etapas sucessivas.

A fim de explanar a aplicação do MQ2E, serão abordados os procedimentos definidos segundo Gujarati e Porter (2011), mas utilizando-se o sistema de equações desenvolvido por Clutter (1963), na forma reduzida, como exemplo.

Ao considerar o sistema:

$$\ln(V_2) = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{I_2} + \beta_2 S + \beta_3 \ln G_2 + \varepsilon_1 \quad (2)$$

$$\ln(G_2) = \ln(G_1) \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + \alpha_0 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) + \alpha_1 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) S + \varepsilon_2 \quad (3)$$

Em que: V_2 = Volume futuro (m^3/ha); I_1 e I_2 = Idade atual e futura (anos); S = Índice de sítio (metros); G_1 e G_2 = Área basal atual e futura (m^2/ha); \ln = logaritmo neperiano, β_i = Parâmetros da regressão.

A variável $\ln(G_2)$, presente na equação (2) é considerada endógena no sistema, logo tem correlação com ε_1 . Desse modo, a etapa 1 tem como objetivo eliminar esse problema:

Estágio 1: Fazer a regressão de $\ln(G_2)$ em função das variáveis exógenas (variáveis instrumentais) presentes no sistema, ou seja, presentes não somente na equação (2) mas nas duas equações envolvidas.

Considerando que as variáveis $\frac{1}{I_2}$ e S sejam exógenas, será ajustada a seguinte equação:

$$\ln(G_2) = \hat{\Pi}_0 \frac{1}{I_2} + \hat{\Pi}_1 S + \hat{u} \quad (4)$$

Da equação (3) é obtido:

$$\ln(\hat{G}_2) = \hat{\Pi}_0 \frac{1}{I_2} + \hat{\Pi}_1 S \quad (5)$$

em que $\ln(\hat{G}_2)$ é uma estimativa de $\ln(G_2)$ médio condicionado aos valores de S e $\frac{1}{I_2}$ fixados.

A equação (4) pode também ser representada como:

$$\ln(G_2) = \ln(\hat{G}_2) + \hat{u} \quad (6)$$

Que mostra que $\ln(G_2)$ estocástico é dividido em duas partes, sendo o $\ln(\hat{G}_2)$, que é a combinação linear das variáveis exógenas não estocásticas $(S \text{ e } \frac{1}{I_2})$ e o componente aleatório \hat{u} que não são correlacionados.

Estágio 2: A equação de volume passa a ser escrita como:

$$\ln(V_2) = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{I_2} + \beta_2 S + \beta_3 (\ln(\hat{G}_2) + \hat{u}) + \varepsilon_1 \quad (7)$$

$$= \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{I_2} + \beta_2 S + \beta_3 (\ln(\hat{G}_2)) + (\varepsilon_1 + \beta_3 \hat{u}) \quad (8)$$

$$= \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{I_2} + \beta_2 S + \beta_3 (\ln(\hat{G}_2)) + \varepsilon^* \quad (9)$$

Em que $\varepsilon^* = \varepsilon_1 + \beta_3 \hat{u}$.

A diferença entre as equações (2) e (9) é que a variável $\ln(G_2)$ foi substituída por $\ln(\hat{G}_2)$, que não é correlacionada com ε^* , assintoticamente, na equação (9), ou seja, na medida em que a amostra cresce indefinidamente. Por fim, o MQO pode ser aplicado à equação (8), que fornecerá os parâmetros do modelo volumétrico e à equação (3) para gerar os parâmetros da equação que estima a área basal futura.

Os autores destacam que em amostras pequenas, o procedimento de MQ2E pode levar à estimação viesada, pois a variável endógena estimada pode ainda ser correlacionada com o erro, porém, essa correlação desaparece à medida que o tamanho da amostra tende ao infinito.

Em síntese, para decidir pela aplicação do MQ2E em substituição ao MQO, deve-se verificar a presença de endogeneidade, a partir de técnicas como o teste de Hausman (1978). Se necessário o uso do MQ2E, é preciso definir as variáveis instrumentais a serem utilizadas no ajuste, verificando sempre se estas seguem aos pressupostos exigidos.

REFERÊNCIAS

- ARCE, J. E.; PIZATTO, W.; SANQUETTA, C. R.; WENDLING, J. L. G.; MAESTRI, R. Utilização das matrizes de transição na avaliação e simulação precoces do crescimento de povoamentos de *Pinus taeda* L. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 27, n.1/2, p. 83-98, 1998.
- BASMANN, R. L. A generalized classical method of linear estimation of coefficients in a structural equation. **Econometrica**, v. 25, p. 77-83, 1957.
- BATHO, A.; GARCÍA, O. De Perthuis and the origins of site index: a historical note. **Fbmis**, v. 1, p. 1-10, 2006.
- BEZERRA, A. F. Modelagem do crescimento e da produção de povoamentos de *Tectona grandis* submetidos a desbaste. 2009. 60 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.
- BORDERS, B.E. Systems of equations in forest stand modelling. **For. Sci.**, p. 35-548–556, 1989.
- BUCKMAN, R. E. Growth and yield of red pine in Minnesota. Washington. 1962. 50 p. (Technical Bulletin, 1272).
- BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. Modeling Forest Trees and Stands. New York: Springer & Science Business, 2012. 457 p. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-90-481-3170-9>>. Acesso em: 10 abr. 2016.
- CALEGARIO N.; CALEGARIO, C. L. L.; MAESTRI R.; DANIEL, S. R. Melhoria da qualidade de ajuste de modelos biométricos florestais pelo emprego da teoria dos modelos não lineares generalizados. **Scientia Forestalis**, v. 1, n. 69, p.38-50, 2005.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. Viçosa: UFV, 2013. 650 p.
- CARVALHO S. P. C. **Uma nova metodologia de avaliação do crescimento e da produção de *Eucalyptus* sp clonal para fins energéticos**. 2010. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2010.
- CARVALHO S. P. C. **Uma nova metodologia de avaliação do crescimento e da produção de *Eucalyptus* sp clonal para fins energéticos**. 2010. 103 f.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2010.

CASTRO, R. V. O.; CUNHA, A. B.; SILVA, L. V.; LEITE, H. G.; SILVA, A. A. L. Modelagem do crescimento e produção para um povoamento de *Eucalyptus* utilizando dois métodos para quantificação do índice de local. **Scientia Forestalis**. p. 83-90, 2015

CASTRO, R. V. O.; SOARES, C. P. B.; MARTINS, F. B.; LEITE, H.G. Crescimento e produção de plantios comerciais de eucalipto estimados por duas categorias de modelos. **Pesquisa Agropecária**, Brasília, v. 48, n. 3, p.287-295, mar. 2013.

CLUTTER, J. L. Compatible growth and yield models for loblolly pine. **Forest Science**, v. 9, n. 3 p. 355-371, 1963.

CLUTTER, J. L.; FORTSON, J. C.; PIENAAR, L. V.; BRISTER, G. H.; BAILEY, R. L. **Timber management**: a quantitative approach. New York: John Wiley & Sons, 1983.

CUNHA NETO, F. R.; SCOLFORO, J. R. S.; OLIVEIRA, A. D. de; CALEGÁRIO, N.; KANEGAE JUNIOR, H. Uso da diferença algébrica para construção de curvas de índice de sítio para *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* na região de Luiz Antônio, SP. **Revista Cerne**, v. 2, n. 2, p. 119-141, 1996.

CRUZ, J. P.; LEITE, H. G.; SOARES, C. P. B.; CAMPOS, J. C. C.; SMIT, L.; NOGUEIRA, G. S.; OLIVEIRA, M. L. R. Modelos de crescimento e produção para plantios comerciais jovens de *Tectona grandis* em Tangará da Serra, Mato Grosso. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 821-828, 2008.

DEMOLINARI, R. D. A.; SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L. DE. Crescimento de plantios clonais de eucalipto não desbastados na região de Monte Dourado (PA). **Revista Árvore**, v. 31, n. 3, p. 503-512, 2007.

DIAS, A. N.; LEITE, H. G.; CAMPOS, J. C. C.; COUTO, L.; CARVALHO, A. F. Emprego de um modelo de crescimento e produção em povoamentos desbastados de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 29, n. 5, p. 731-739, 2005.

DIAS, A. N. **Modelagem e avaliação econômica de plantações de eucalipto submetidas a desbastes**. 2000. 70 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2000.

FERREIRA, M. Z. Modelagem da influência de variáveis ambientais no crescimento e produção de *Eucalyptus* sp. 2009. 112 p. Tese (Pós-Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2009.

GORGENS, E. B.; LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; DIAS, A. N. Tendência de crescimento de povoamento de eucalipto após aplicação de desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 879-885, 2007.

GUJARATI, D.N.; PORTER, D. C. **Basic econometrics**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

HANSEN, B.E. **Econometrics**. University of Wisconsin .Wisconsin: Department of Economics, 2017.

HAUSMAN, J. A. "Specification Tests in Econometrics". **Econométrica**, v. 46, p. 1251-1271, 1978.

MACHADO, S. A.; CARPANEZZI, A. A. Classificação de sítio para bracingais na região metropolitana de Curitiba. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 35, p.21-37, jul./dez. 1997.

MACHADO, S. do A. Efeito de Variáveis Climáticas no Crescimento Mensal de *Pinus taeda* e *Araucaria angustifolia* em fase juvenil. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 2, p. 170-181, abr./jun. 2014.

MACKINNEY, A. L.; SCHUMACHER, F. X.; CHAIKEN, L. E. Construction of yields tables for non-normal loblolly pine stands. **J. Agric. Rev**, v. 54, p. 531-545, 1937.

MAESTRI, R.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E. Modelagem do Crescimento de Povoamentos de *Eucalyptus grandis* Através de Processos de Difusão. Curitiba: **Revista Floresta**, v. 33, n. 2, p 169-182, jan./jul, 2003.

MAKELA , A.; LANDSBERG, J. J.; EK, A. E., BURK, T. E.; TERMIKAEIAN, M.; AGREN, G.; OLIVER, C.D.; PUTTONEN, P. Process-based models for forest ecosystem management: current state-of-art and challenges for practical implementation. **Tree Physiology**, Oxford, v. 20, p. 289-298, 2000.

MELO, E. A. **Desenvolvimento de modelos para crescimento florestal e afilamento de fuste**. 2014. 122 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

MENDONÇA, A. R.; CALEGARIO, N.; SILVA, G. F.; SOUZA, A. L.; TRUGILHO, P. F.; CARVALHO, S. P. C.; POSSATO, E. L. Modelagem da produção de sortimentos em povoamento de Eucalipto. **Cerne**, v. 20, n. 4, p. 587-594, 2014.

MIRANDA, R. O. V.; DIAS, A. N.; FILHO, A. F.; SOARES, I. D.; CRUZ, J. P. Modelagem do crescimento e produção em classes de precipitação pluviométrica para *Eucalyptus* sp. **Floresta**, v. 45, n. 1, p. 117, 2014.

NASCIMENTO, F. A. F. DO; DIAS, A. N.; FIGUEIREDO FILHO, A.; MIRANDA, G. D. M.; ARCE, J. E. Sistema de crescimento e produção para povoamentos de *Pinus taeda* na região norte de Santa Catarina. **Cerne**, v. 21, n. 2, p. 235-242, 2015.

OLIVEIRA, E. B. **Um sistema computadorizado de prognose de crescimento e produção de Pinus taeda L. com critérios quantitativos para a avaliação técnica e econômica de regimes de manejo**. 1995. 126 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 1995.

OLIVEIRA, J. C. **Modelagem de crescimento e produção de clones de eucalipto empregando mínimos quadrados generalizados**. 2012. 88 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.

PIENAAR, L. V.; SHIVER, B. D. Basal area prediction and projection equations for pine plantations. *For Sci*, v. 32, p. 626-633, 1986.

PIENA, A. R. L. V.; SHIVER, B. D.; GRIDER, G. E. Predicting basal area growth in thinned slash pine plantations. **For Sci**, v. 31, p. 731-741, 1985.

RETSLAFF, F. A. S.; FIGUEIREDO FILHO, A.; DIAS, A. N.; BERNETT L. G.; FIGURA, M. A. Prognose do crescimento e produção em classes de diâmetro para povoamentos desbastados de *Eucalyptus grandis* no Sul do Brasil. **Revista Árvore**, v. 36, p. 719-732, 2012.

ROLLINSON, T. J. D. Thinning control of conifer plantations in Great Britain. **Annals of Forest Science**, v. 44, n. 1, p. 25-34, 1987.

ROVEDA, M.; DIAS, A. N.; FILHO, A. F. Testes de identidade de modelos aplicados na construção de curvas de índices de local e na produção de povoamentos de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, p. 115-127, 2016.

SALLES, T. T.; LEITE, H. G.; OLIVEIRA NETO, S. N.; SOARES, C. P. B.; PAIVA, H. N.; SANTOS, F. L. Modelo de Clutter na modelagem de crescimento e produção de eucalipto em sistemas de integração lavoura - pecuária - floresta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 2, p. 253-260, fev. 2012.

SANTANA, C.; MELLO, A. A. de; EISFELD, R. D. L.; SANQUETTA, C. R. da. Sistema de equações para simulação do crescimento e da produção em povoamentos de *Eucalyptus grandis* Hill ex maiden. sem desbaste baseado no modelo de Clutter. **Ambiência**, v. 1, n. 2, p. 239-256, 2005.

SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. Determinação de regimes de desbaste para povoamentos de *Pinus elliottii* E. do Planalto Ocidental no Estado de Santa Catarina. **Ciência Florestal**, v. 4, n. 1, p. 43-59 1994.

SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G.; HOPPE, J. M.; DRESCHER, R.; SCHEEREN, L.W. MAINARDI, G.; FLEIG F. D. Produção de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden em diferentes intensidades de desbaste. **Ciência Florestal**, v. 8, n. 1, p. 129-140, 1998.

SCHUMACHER, F. X. A new growth curve and its application to timber yield studies. **J. For**, v. 37, p. 819-820, 1939.

SILVA, A.; CAMPOS, J.; LEITE, H. Growth and yield prediction using the modified Buckman model. **Revista Árvore**, v. 30, n. 5, p. 787-793, 2006.

SIMÕES, J.W. et al. **Formação, manejo e exploração de florestas com espécies de rápido crescimento**. Brasília: IBDF, 1981. 131 p.

SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G. Predição da produção de madeira de eucalipto em região com alta variabilidade pluviométrica. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, n. 58, p. 41-48, 2000.

SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; GORGENS, E. B. Equações para estimar o estoque de carbono no fuste de árvores individuais e em plantios comerciais de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 5, p. i-f., oct. 2005.

SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; OLIVEIRA, M. L. R. DE; CARVALHO, A. Especificação de um modelo de crescimento e produção florestal. **Revista Árvore**, v. 28, n. 6, p. 831-837, 2004.

SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; CAMPOS, J. C. C.; SEDIYAMA, G. C. A inclusão da precipitação anual em um modelo de crescimento e produção. **Revista Árvore**, v. 22, n. 4, p. 475-482, 1998.

THEIL, H. **Repeated least-squares applied to complete equation systems**. The Hague: The Central Planning Bureau, The Netherlands, 1953. (Mimeografado).

VANCLAY, J. K. **Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forests**. Copenhagen: CAB International, 1994. 312 p.

WOLFF II, N. I. **Modelagem do crescimento e da produção de Pinus taeda I.2012**. 62 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Centro-oeste, Irati, PR, 2012.

WOOLDRIDGE, J. M. **Introdução à Econometria** - Uma Abordagem Moderna. 4. ed. São Paulo: Saraiva, 2011.

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

**ARTIGO 1 - SELEÇÃO DE MODELO PARA CONSTRUÇÃO DE
CURVAS DE ÍNDICE DE LOCAL EM POVOAMENTOS DE
EUCALIPTO DESBASTADO E NÃO DESBASTADO**

Artigo com a formatação baseada na NBR 6022 (ABNT, 2003), conforme orienta o Manual de Normalização de trabalhos acadêmicos da UFLA.

RESUMO

Diante das diferentes possibilidades de uso e destinação da matéria prima fornecida pelos plantios florestais no Brasil, torna-se importante definir as atividades silviculturais e de manejo mais adequadas, assim como verificar a capacidade produtiva do local, buscando atingir a máxima produtividade e sustentabilidade do plantio. A análise da capacidade produtiva do local permite prever os riscos do empreendimento. Esta pode ser realizada de forma quantitativa, gerando um índice de sítio, que é utilizado como *input* em modelos de prognose de crescimento e produção florestal. Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi comparar diferentes modelos matemáticos/estatísticos não lineares para a classificação da capacidade produtiva de povoamentos de eucalipto desbastado e não desbastado, utilizando o método da curva guia e o método da modelagem das medidas longitudinais da hdc, em diferentes unidades amostrais e potenciais de local. Para tanto, foi utilizado o método da curva-guia e foram testados os modelos de Schumacher, Chapman-Richards, Logístico, Gompertz e Bailey-Clutter, que foram comparados por meio das estatísticas do erro padrão residual ($Sy.x$) e percentual ($Sy.x\%$), critério de informação de Akaike (AIC), critério de informação Bayesiano (BIC), e da consistência observada entre as curvas de índices de local e a dispersão das alturas dominantes observadas. Além disso, foi verificado, na base não desbastada, a conformação dos dados, por meio do ajuste do modelo de Schumacher, por grupos de altura dominante na idade de referência (7 anos) e comparação dos parâmetros a partir do teste Z. O modelo de Chapman-Richards foi o que melhor se ajustou às duas bases de dados, com e sem desbaste, apresentando curvas mais apropriadas para o comportamento apresentado pela variável altura dominante, o desbaste realizado por baixo não afeta o crescimento em altura dominante, e foi verificado presença de conformação polimórfica dos dados entre as curvas do grupo 20 e 25.

Palavras-chave: Método da curva guia. Chapman-Richards. Modelo não linear.

ABSTRACT

Given the different possibilities of use and destination of the raw material provided by the forest plantations in Brazil, it is important to define the silvicultural and management activities more appropriate as well as verify the productive capacity of the place, seeking to achieve maximum productivity and sustainability of the planting. The analysis of the productive capacity of the site allows to predict the risks of the enterprise, this can be carried out quantitatively, generating a site index, which is used as input in models of prognosis of growth and forest production. Thus, the objective of this work was to compare different mathematical models for the classification of the productive capacity of eucalyptus plantations with thinned and not roughly trimmed. For this, the guide curve method was used and the Schumacher, Chapman-Richards, Logistic, Gompertz and Bailey-Clutter models were tested, which were compared using the residual standard error ($Sy.x$) and percentage ($Sy.x\%$), Akaike information criterion (AIC), Bayesian information criterion (BIC) and the consistency observed between the local index curves and the dispersion of dominant heights observed. In addition, the shape of the data, by adjusting the Schumacher model, by groups of dominant height at the reference age (7 years) and comparison of the parameters from the Z test was checked at the unstacked base. The model Of Chapman-Richards was the one that best adjusted to the two databases, with and without thinning, presenting curves more appropriate for the behavior presented by the variable dominant height, the thinning performed from below does not affect the growth in dominant height and was verified presence Of polymorphic conformation of the data between the curves of groups 20 and 25.

Keywords: Guide Curve Method. Chapman-Richards. Nonlinear model.

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço das técnicas de condução dos povoamentos equiâneos, tornou-se possível ampliar a variedade de produtos obtidos a partir desses plantios, abrangendo diferentes segmentos na área florestal. Dessa forma, esta atividade tem apresentado grande expansão no país, favorecendo as demandas nacionais e internacionais. Portanto, a escolha da finalidade do plantio tem impacto direto nas técnicas de manejo a serem adotadas, como a aplicação ou não do desbaste, visando a obtenção de um produto final que apresente as características desejáveis pelo consumidor.

A distinção entre as técnicas a serem aplicadas dependem das condições edafoclimáticas, dos objetivos da produção e alteram diretamente os custos, assim como as receitas. Deste modo, é importante avaliar os riscos e consequências de se conduzir o povoamento para determinado fim, buscando aplicar as práticas silviculturais e de manejo adequadas para atingir a produtividade esperada.

Uma das formas de prever os riscos do empreendimento é a análise da capacidade produtiva do local, ou seja, o potencial que a região possui para produzir madeira para determinada espécie, definido por fatores ambientais. Essa análise pode ser realizada de forma quantitativa, gerando um índice de sítio, que é utilizado como *input* em modelos de prognose do crescimento e produção florestal.

As técnicas utilizadas para esse fim são divididas em dois tipos: métodos indiretos e diretos. Os métodos indiretos baseiam-se em características topográficas, climáticas e edáficas do local, e os métodos diretos são fundamentados em medidas do povoamento, como volume ou altura (CLUTTER et al., 1983). Logo, a medida mais comumente utilizada para indicar a qualidade do local é a altura média das árvores dominantes e codominantes (*hdc*), por

possuir alta correlação com o volume e ser uma variável não afetada pela densidade do plantio (BURKHART; TOMÉ, 2012). Vale ressaltar que a hdc não é afetada pela densidade do plantio dentro de uma faixa comercial. Valores extremos de densidade afetam a hdc, assim como outras variáveis biométricas florestais.

Com a modelagem da hdc como uma função da idade do povoamento, é possível estimar os índices de local, que representam as hdc numa idade de referência, ou idade índice. Nesta modelagem, são utilizados modelos matemáticos/estatísticos lineares, pela transformação das variáveis, ou não lineares assintóticos ou sigmoidais.

Cabe ressaltar, que dentre os métodos de classificação, o método da curva guia é muito utilizado e tem proporcionado resultados consistentes em povoamentos de eucalipto (MIGUEL et. al., 2011; PEGO; ASSIS; CABACINHA, 2015; RETSLAFF et al., 2015). Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi comparar diferentes modelos matemáticos/estatísticos não lineares, para a classificação da capacidade produtiva de povoamentos de eucalipto desbastado e não desbastado, utilizando o método da curva guia e o método da modelagem das medidas longitudinais da hdc, em diferentes unidades amostrais e potenciais de local.

2 METODOLOGIA

2.1 Descrição dos dados

Um primeiro conjunto longitudinal (remedido ao longo do tempo), de dados para este estudo, foi obtido com inventário florestal contínuo, conduzidos em povoamentos de eucalipto no Município de Virginópolis, na região Centro Oeste de Minas Gerais, o clima é do tipo cwa – clima de inverno seco e verão chuvoso. A temperatura do mês mais frio é inferior a 18 graus e a do mês mais quente superior a 22 graus. O relevo é fortemente ondulado, com presença de afloramentos rochosos e os solos predominantes são latossolos e cambissolos, com Latitude 18°49'5" Sul e Longitude 41°41'46" oeste, com altitude de 743 m. O povoamento foi conduzido em regime de alto fuste, com espaçamento inicial de 3,0 x 3,0 m², os dados foram obtidos entre 2006 e 2013, em 295 unidades amostrais retangulares, com cerca de 300 m² de área, entre 3 a 8 remedições. A intensidade amostral aproximada foi de 1:10 (uma parcela a cada 10 hectares), ou seja, os povoamentos ocupam uma área de aproximadamente 3000 hectares e são manejados para produção de madeira para celulose.

Um segundo conjunto de dados foi obtido de um experimento de desbaste no nordeste da Bahia, em povoamentos do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, que foi instalado em setembro de 1995, quando os povoamentos estavam com 27 meses. Esse experimento foi instalado em três locais, com diferentes capacidades produtivas: Bonfim (11°52' S e 38°32' O, 285 m de altitude e 900 mm de precipitação anual média); Tombador (12°03' S e 38°28' O, 290 m de altitude e 1100 mm de precipitação anual média); e Lagoa do Bu (11°47' S e 37°55' O, 150m de altitude e 1200 mm de precipitação média anual). As unidades amostrais experimentais possuem uma área de 2600 m² com

espaçamento inicial de 3,5 x 2,6 m². O delineamento foi em blocos casualizados, com dois blocos por local e duas repetições por bloco.

Os tratamentos avaliados consistiram na remoção da área basal presente na idade do desbaste, sendo: 20% (T1), 35% (T2), 50% (T3) e 35% mais desrama artificial até 6,0 m de altura (T4). O primeiro desbaste foi realizado aos 58 meses de idade, e em seguida aos 142 meses, removendo os indivíduos de menor dimensão. As variáveis mensuradas foram: diâmetro a 1,30 m de todas as árvores, altura total de aproximadamente 15 árvores escolhidas aleatoriamente, altura de 5 árvores dominantes por parcela e a qualidade de cada árvore (bifurcação, dominante, normal, colhida ou morta). Mais detalhes sobre o experimento são encontrados em Campos e Leite (2013), Nogueira et al. (2015), Santos (2008) e Dias (2005).

Os métodos e análises apresentados nos itens subsequentes foram aplicados a essas duas bases de dados.

2.2 Classificação da capacidade produtiva

A classificação da capacidade produtiva foi feita pelo método direto, com a construção de curvas de índices de local. Foi utilizado o método da curva-guia e avaliados os ajustes dos modelos estatísticos não lineares de Schumacher, Chapman-Richards, Logístico 3 parâmetros, Gompertz 3 parâmetros e Bailey-Clutter 3 parâmetros (Tabela 1).

Para todos os modelos ajustados foram geradas seis curvas anamórficas discriminando os dados em três classes de local, para uma idade índice de 7 anos.

Tabela 1 - Modelos testados para estimação da altura média dominante e codominante e classificação da capacidade produtiva para os povoamentos de eucalipto com e sem aplicação de desbaste por baixo.

Modelo	Modelo estatístico	Função de índice de sítio
Schumacher	$\overline{HDC}_i = \phi_0 * e^{\left(\phi_1 * \left(\frac{1}{I_i}\right)\right)} + \varepsilon_i$	$S = \overline{HDC}_i * e^{\left[\phi_1 \left(\frac{1}{I_{ref}} - \frac{1}{I_i}\right)\right]} + \varepsilon_i$
Chapman-Richards	$\overline{HDC}_i = \phi_0 * (1 - e^{(\phi_1 * I_i)})^{\phi_2} + \varepsilon_i$	$S = \overline{HDC}_i * \left(\frac{1 - e^{(\phi_1 * I_{ref})}}{1 - e^{(\phi_1 * I_i)}}\right)^{\phi_2} + \varepsilon_i$
Logístico 3 parâmetros	$\overline{HDC}_i = \frac{\phi_0}{1 + e^{\left(\frac{\phi_1 - I_i}{\phi_2}\right)}} + \varepsilon_i$	$S = \overline{HDC}_i * \frac{1 + e^{\left(\frac{\phi_1 - I_{ref}}{\phi_2}\right)}}{1 + e^{\left(\frac{\phi_1 - I_i}{\phi_2}\right)}} + \varepsilon_i$
Gompertz 3 parâmetros	$\overline{HDC}_i = \phi_0 * e^{-e^{(\phi_1 - \phi_2 * I_i)}} + \varepsilon_i$	$S = \overline{HDC}_i * \frac{e^{-e^{(\phi_1 - \phi_2 * I_{ref})}}}{e^{-e^{(\phi_1 - \phi_2 * I_i)}}} + \varepsilon_i$
Bailey-Clutter 3 parâmetros	$\overline{HDC}_i = \phi_0 * (1 - e^{\phi_1 * I_i^{\phi_2}}) + \varepsilon_i$	$S = \overline{HDC}_i * \frac{(1 - e^{\phi_1 * I_{ref}^{\phi_2}})}{(1 - e^{\phi_1 * I_i^{\phi_2}})} + \varepsilon_i$

Onde: \overline{HDC}_i = altura média das árvores dominantes e codominantes da i-ésima unidade amostral (m); I_i = idade da i-ésima unidade amostral (anos), I_{ref} = idade de referência, S = índice de sítio, Ln = logaritmo neperiano, ϕ_0, ϕ_1, ϕ_2 e ϕ_3 = parâmetros e ε_i = erro aleatório.

Os ajustes e aplicação dos modelos foram alizados utilizando os *softwares* R e Microsoft Excel, respectivamente.

2.3 Análise estatística das estimativas de Hdc

A avaliação dos ajustes foi realizada em função das estatísticas do erro padrão residual (Sy.x) (1) e percentual (Sy.x%) (2), critério de informação de Akaike (AIC) (3), conforme Sakamoto, Ishiguro e Kitagawa (1986), critério de

informação Bayesiano (BIC) (4), conforme Schwarz (1978e), a consistência observada entre as curvas de índices de local e a dispersão das alturas médias dominantes e codominantes observadas e a análise gráfica dos erros relativos percentuais (ER%) (5), sendo:

$$Sy.x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y - \hat{y})^2}{n - p - 1}} \quad (1)$$

$$Sy.x(\%) = \frac{Sy.x}{\bar{y}} * 100 \quad (2)$$

$$AIC = -2 * \ln(mv) + 2 * p \quad (3)$$

$$BIC = -2 * \ln(mv) + p * \ln(n) \quad (4)$$

$$ER\% = \frac{(y - \hat{y})}{y} * 100 \quad (5)$$

em que: $Sy.x$ = erro padrão residual (m); $Sy.x$ (%) = erro padrão relativo; y = valor observado da variável dependente; \hat{y} = valor estimado da variável dependente; n = número de observações; p = número de parâmetros do modelo; mv = valor da máxima verossimilhança; \ln = logaritmo neperiano.

Com as parcelas classificadas, pelo rearranjo dos modelos, foi realizado o teste de estabilidade para cada equação, considerando o número de vezes que as parcelas mudaram de classificação no decorrer do tempo. Para esta análise foram consideradas apenas as parcelas contempladas pelas curvas em todo decorrer do tempo considerado no ajuste.

2.4 Classificação da capacidade produtiva pela modelagem da trajetória longitudinal dos dados de altura média dominante e codominante

Com o intuito de verificar o morfismo dos dados, foi proposta uma análise, em que foi utilizado o modelo de Schumacher, por se tratar de um modelo assintótico, ou seja, representa bem o comportamento da relação entre hdc e idade, e por ser parcimonioso (menor número de parâmetros) o que facilita sua interpretação.

A modelagem da trajetória longitudinal foi aplicada apenas aos dados pertencentes ao povoamento não desbastado, com os quais foi feito o ajuste do modelo de Schumacher a partir da diferenciação do povoamento em grupos, em que cada grupo compôs uma classe de acordo com os valores de altura média dominante e codominante observadas na idade de aproximadamente 7 anos (idade de referência), variando de 20 a 25 metros (grupo 20), 25 a 30 (grupo 25), 30 a 35 (grupo 30) e 35 a 40 (grupo 35).

Com o intuito de definir um número significativo de unidades amostrais para proceder esta análise, foi calculada a suficiência amostral (6) por grupo, considerando os valores observados de hdc na idade de aproximadamente 7 anos e um erro admissível de 5%.

As unidades amostrais de cada grupo possuíram remedições no tempo, ou seja, uma base longitudinal de dados, e foram aleatorizadas n parcelas pertencentes a cada grupo para fazer o ajuste. Por fim, foi realizado o teste Z (7) para comparar os parâmetros dos modelos de cada curva ajustada e verificar se existe diferença entre eles. Na hipótese de nulidade, ou seja, não havendo diferenças entre os parâmetros das curvas, o sistema será classificado como anamórfico.

$$n = \frac{t^2 + CV\%^2}{E\%^2 + \frac{t^2 + CV\%^2}{N}} \quad (6)$$

$$Z = \frac{|\beta_{0Ga} - \beta_{0Gb}|}{\sqrt{EP^2_{Ga} + EP^2_{Gb}}} \quad (7)$$

Em que: n = número de parcelas a serem aleatorizadas por grupo; t = valor da estatística t (considerado igual a 2); $CV\%$ = coeficiente de variação da hdc na idade de aproximadamente 7 anos para cada grupo; $E\%$ = erro máximo admissível; N = número de parcelas cabíveis na área; Z = valor da estatística Z calculada; β_{0Ga} = parâmetro resultante do ajuste de diferentes grupos a serem confrontados; EP_{Ga} = erro padrão de cada parâmetro.

Após esta análise foi feita a comparação entre os valores estimados pelos modelos ajustados por grupo e o ajuste anamórfico, observando graficamente a trajetória das parcelas, em função do valor estimado para cada grupo.

2.5 Definição da amplitude de classe para o ajuste polimórfico

O sistema de curvas gerado pela análise da trajetória das parcelas, tem representado graficamente a curva média pertencente a cada grupo (classe). Dessa forma, a definição da amplitude de classe pode ser feita de acordo com as amplitudes entre as hdc's estimadas na idade de referência por grupo, gerando intervalos em função da variação de hdc aos 7 anos (idade de referência).

Dessa forma, a amplitude gerada será coerente com a capacidade produtiva do local e não iguais para todos os grupos, como é feito nos sistemas de curvas anamórficas. Isto é, a amplitude é definida a partir da diferença entre a hdc de um grupo e a hdc do grupo inferior, dividido por dois, determinando o desvio acima e abaixo da curva que resultará na amplitude do grupo em questão.

Portanto, após a análise do morfismo dos dados, foi gerado o gráfico das curvas pertencentes a cada classe, em que as amplitudes destas foram definidas conforme descrito acima.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Povoamento não desbastado

Na Tabela 2 estão apresentadas as estimativas dos parâmetros dos modelos ajustados e suas análises estatísticas. Pelo critério erro padrão percentual ($Sy.x\%$), o modelo de Chapman-Richards foi o que apresentou o melhor resultado, seguido pelos modelos de Bailey-Clutter, Schumacher, Gompertz e Logístico. Em relação aos critérios de informação de Akaike (AIC) e bayesiano (BIC), o modelo de Chapman-Richards apresentou os menores valores, seguido por Bailey-Clutter, Schumacher, Gompertz e Logístico.

Todos os modelos utilizados são assintóticos, portanto o valor de ϕ_0 corresponde à assíntota horizontal superior, o qual representa o valor máximo em altura dominante e codominante estimado.

Tabela 2 - Estimativas dos parâmetros e correspondentes estatísticas obtidas nos ajustes dos modelos aos dados do povoamento não desbastado.

Modelo	Parâmetros			Estatísticas		
	ϕ_0	ϕ_1	ϕ_2	Sy.x %	AIC	BIC
Schumacher	40,48681	-2,31416	-	10,85	8116,34	8132,66
Chapman-Richards	33,10011	-0,34422	1,32697	10,82	8109,66	8131,42
Logístico 3p	31,11999	2,45104	1,65019	10,90	8134,11	8155,88
Gompertz 3p	31,96719	0,79145	0,45814	10,85	8116,29	8138,06
Bailey-Clutter 3p	32,65822	-0,22795	1,17731	10,83	8110,46	8132,22

As análises estatísticas de exatidão, ainda que indispensáveis, não permitem decidir com segurança o modelo mais adequado no caso de construção de curvas de índices de local. É também necessário observar a tendência das curvas de índices de local em relação à dispersão das alturas dominantes

observadas, uma vez que estas determinam os limites para a classificação das parcelas. Portanto, as curvas geradas devem se ajustar e descrever de modo consistente a tendência observada nos dados. Caso contrário, o modelo será inadequado para representar o comportamento da variável altura média dominante e codominante no decorrer do tempo.

Desse modo, para cada modelo testado, foram construídas quatro curvas de índices de local, delimitando três classes. No povoamento não desbastado, o limite das classes foi de 23 a 35 m com 4 m de amplitude (Figura 1).

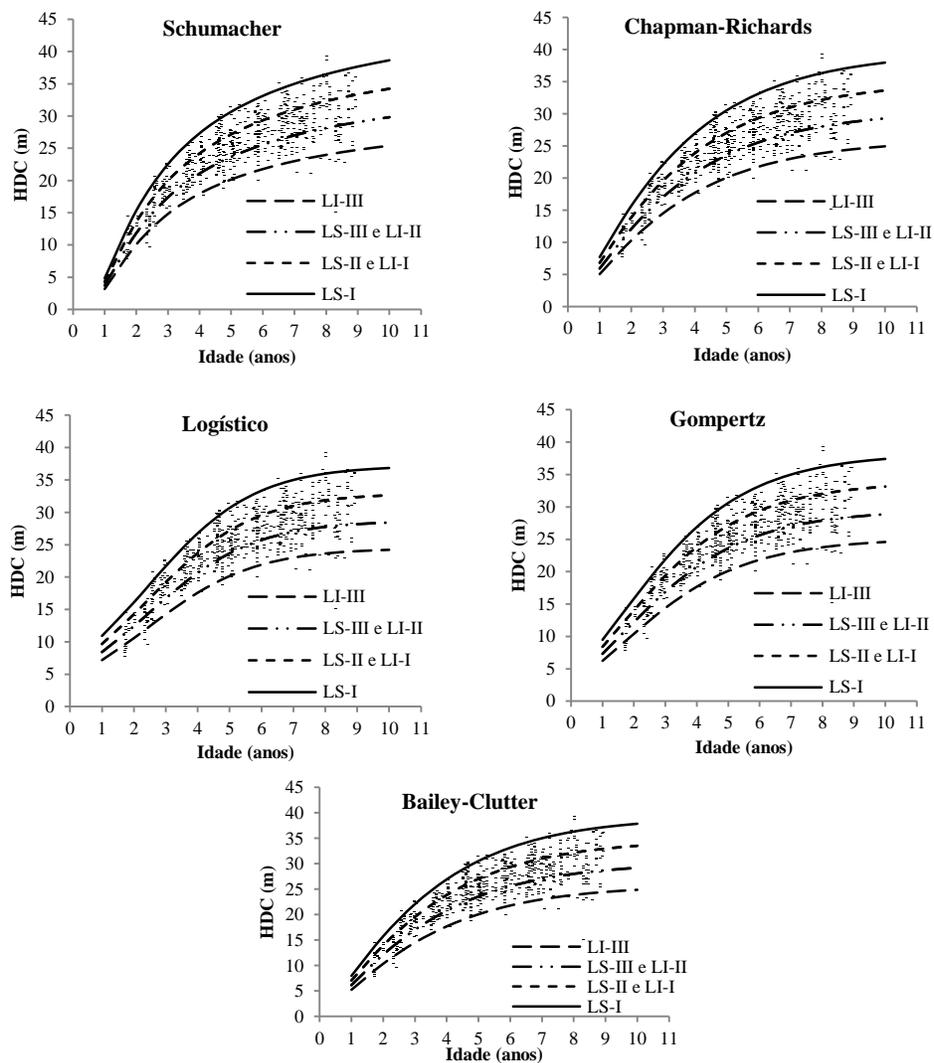
É possível perceber poucas mudanças entre os modelos, com uma leve diferença no comportamento assintótico dos mesmos. O modelo de Schumacher tende a apresentar uma estagnação mais tardia, apresentando uma leve tendência ascendente, esse comportamento não se mostrou apropriado para essa base de dados, que possui estagnação prévia em relação ao comportamento demonstrado pelo modelo.

Em contrapartida, nos modelos Logístico e Gompertz, as assíntotas ocorrem de forma mais prematura. O modelo Logístico possui uma configuração sigmoideal mais expressiva, que também não se mostrou adequada para essa base de dados, pois, esse comportamento, fez com que os dados, nas menores idades, não fossem devidamente contemplados pelas curvas. Assim sendo, os modelos de Bailey-Clutter e de Chapman-Richards foram os que melhor acompanharam a tendência das alturas dominantes observadas para o povoamento não desbastado, abrangendo a grande maioria dos dados.

Cabe ressaltar, que se trata de modelos não lineares sigmoideais, caracterizados por apresentar parâmetros interpretáveis, como assíntota, ponto de inflexão e escala, serem parcimoniosos, além de possibilitar estimativas confiáveis para valores fora do conjunto de dados (CALEGARIO et al., 2005), ou seja, representam melhor o comportamento de dados biológicos, principalmente para ajustes com essa finalidade, onde as alturas dominantes,

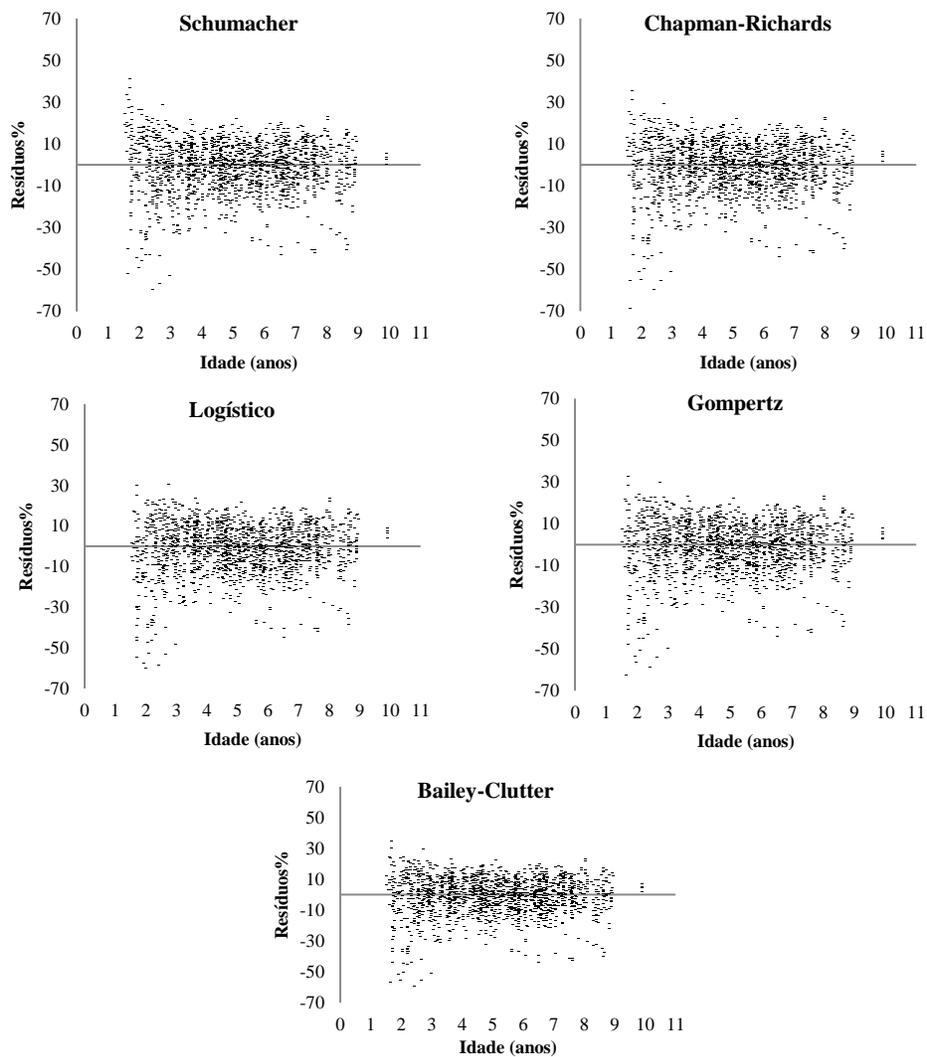
naturalmente, apresentam comportamento assintótico nas maiores idades (RETSLAFF et al., 2015).

Figura 1 - Curvas de índices de local e dispersão das alturas dominantes observadas para os modelos ajustados na base de dados do povoamento de eucalipto não desbastado. Em que: LS e LI (limite superior e inferior); I, II, III (sítios I, II e III).



Com relação à dispersão gráfica dos resíduos puros percentuais (Figura 2), foi observado que todos os modelos apresentaram maior variação nas menores idades, principalmente os modelos Logístico e Gompertz. Apesar disso, os resíduos se apresentaram de forma balanceada no decorrer do tempo.

Figura 2 - Dispersão dos erros relativos percentuais em função da idade para os modelos ajustados na base de dados do povoamento de eucalipto não desbastado.



Nos estudos que envolvem a classificação da capacidade produtiva, é possível observar que alguns deles consideram que o intervalo delimitado pelas curvas deve compreender todas as parcelas, isto é, abrangendo toda a variação em altura dominante observada, geralmente para que isso seja possível são geradas muitas classes ou intervalos muito grandes entre as classes, enquanto em outros trabalhos as parcelas fora das curvas são consideradas como pertencentes às classes mais e menos produtivas. Essa diferença entre os estudos esbarra na falta de padronização para definir se as parcelas devem ou não serem totalmente contempladas pelas curvas ou se deve considerar uma quantidade significativa para tornar a classificação válida.

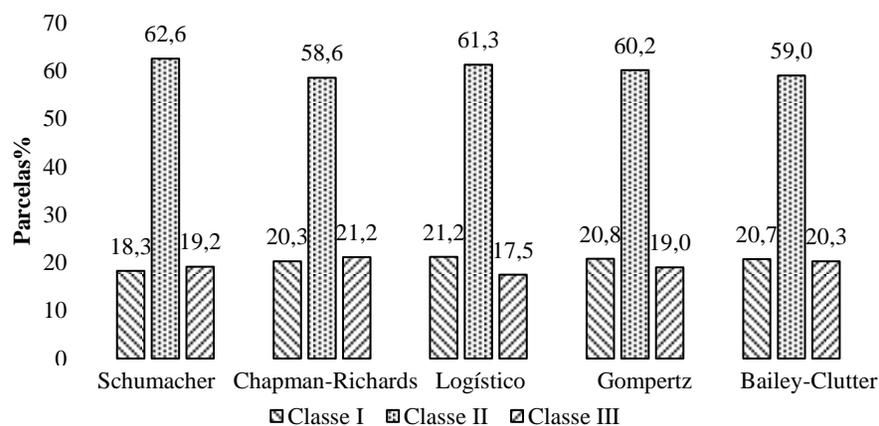
Diante disso, para o teste da estabilidade das parcelas foram consideradas apenas aquelas contempladas pelas curvas em todo decorrer do tempo (Tabela 3), em que foi verificado que os modelos de Chapman-Richards e Bailey-Clutter apresentaram o maior valor (75,25%) de parcelas abrangidas pelas curvas, embora no geral os valores tenham sido muito próximos e todos se encontraram acima de 70%. Os menores valores de estabilidade foram dos modelos de Schumacher e Chapman-Richards com 337 e 356 mudanças de classe, respectivamente, sendo considerados os mais estáveis.

Além disso, é possível observar que no geral, para todos os modelos testados, a maior parte das parcelas está presente na classe intermediária (>50%) (Figura 3) o que geralmente é esperado e corrobora com trabalhos desenvolvidos por Bila et al. (2012); Miguel et al. (2011) e Pego et al. (2015). O restante esteve dividido entre a classe mais produtiva e a classe menos produtiva, de forma balanceada. Uma maior concentração em torno da média é esperada com base no Teorema do Limite Central. Para grandes amostras, a distribuição das médias amostrais serão normalmente distribuídas.

Tabela 3 - Número de parcelas abrangidas pelas curvas em todo o decorrer do tempo (absoluto e relativo), valor da estabilidade, e número de parcelas por classe (absoluto e relativo) para cada equação ajustada para o povoamento não desbastado.

Modelos	Nº parcelas	%	Estabilidade	I	II	III	I%	II%	III%
Schumacher	219	74,24	337	40	137	42	18,3	62,6	19,2
Chapman-Richards	222	75,25	356	45	130	47	20,3	58,6	21,2
Logístico	217	73,56	358	46	133	38	21,2	61,3	17,5
Gompertz	221	74,92	355	46	133	42	20,8	60,2	19,0
Bailey-Clutter	222	75,25	358	46	131	45	20,7	59,0	20,3

Figura 3 - Porcentagem de parcelas pertencentes a cada classe de acordo com a classificação das equações analisadas.



Todos os modelos testados foram eficientes e apresentaram bons ajustes, podendo ser utilizados em estudos para classificação da capacidade produtiva do local. Porém, neste estudo, dentre os modelos analisados, o modelo selecionado para estimar os índices de local no povoamento não desbastado foi o de

Chapman-Richards, pois proporcionou o melhor ajuste, principalmente por apresentar melhor consistência em relação à dispersão dos dados observados, além de resultados estatísticos satisfatórios e dispersão residual homogênea e não tendenciosa.

Em diversos estudos, utilizando o método da curva-guia em plantios de eucalipto não desbastado, foi selecionado o modelo de Chapman-Richards como o melhor ajuste, tendo como exemplo: Retslaff et al. (2015) na região dos Campos Gerais (Paraná), Miguel et al. (2011) em Goiás, no qual, além de apresentar bom ajuste, o modelo obteve boa estabilidade na classificação das parcelas e Santana et al. (2005) no Paraná.

Em outras abordagens, como o ajuste considerando modelo misto com assíntota aleatória, o mesmo também foi indicado como o mais adequado para gerar os índices de local em plantações de eucalipto na Venezuela (CARRERO et al., 2008). Resultados satisfatórios também foram obtidos com outras espécies, como estudo desenvolvido por Bila et al. (2012), para plantios de *Pinus caribaea var. hondurensis* em Minas Gerais e, Machado e Carpanezzi (1997), em povoamentos naturais de bracinga (*Mimosa scabrella* Benth.) na região metropolitana de Curitiba. Isto comprova a eficiência e flexibilidade do modelo de Chapman-Richards para fins de classificação da capacidade produtiva de um local.

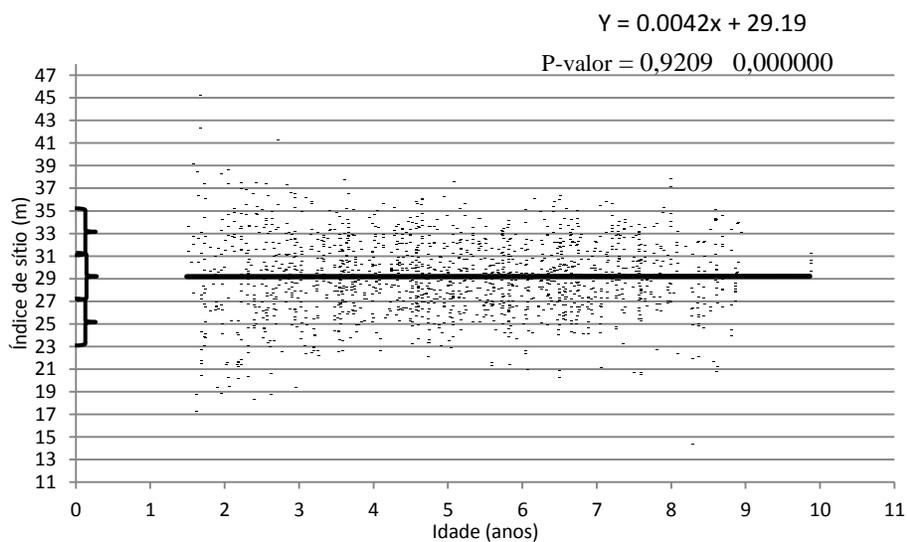
Um fato importante é que os índices de local (S) apresentam estabilidade no tempo. Isso significa que, independentemente da idade, esses valores estarão variando entre os limites das classes de local preestabelecidos, ou seja, representando o valor da altura dominante na idade de referência, a qual é fundamental para que se faça uma comparação entre locais com diferentes produtividades, pois, sem a idade de referência, será somente indicado a h_{dc} do povoamento em diferentes idades, que é simplesmente uma medida do tamanho das árvores.

O que possibilita tal comparação é que as hdc's são projetadas para uma mesma idade, permitindo que se faça a determinação da capacidade produtiva do local, isto é, o quão altas as árvores são, foram ou serão, na idade de referência escolhida, indicando melhor potencial, quanto maior a hdc das árvores, que variam em função do local, por isso a diferenciação por classes (BETTINGER, et al., 2009).

Ao gerar uma linha de tendência entre os índices de sítio (Figura 4), percebe-se que o ajuste gera um valor de β_0 (29,19) altamente significativo, enquanto o β_1 (0,0042) não apresenta significância, comprovando essa tendência e eficiência na estimativa dos valores de sítio, uma vez que são utilizados nos modelos de projeção do crescimento e produção florestal, o que exige estimativas mais precisas.

As classes mais e menos produtivas possuem maior dispersão em relação a classe intermediária, esse fenômeno pode estar associado às mudanças nas condições ambientais, que não sejam benéficas ao crescimento da floresta e, ao uso mais intensivo dos recursos no período inicial, tendendo a exaurir a produtividade do povoamento. Mudanças climáticas têm ocorrido nos últimos anos, afetando diretamente a dinâmica florestal. Portanto, no manejo florestal, é sempre importante considerar os processos que afetam essa dinâmica em longo prazo (FONTES et al. 2010).

Figura 4 - Tendência dos valores de índices de local para diferentes produtividades para o povoamento de eucalipto não desbastado.



3.2 Povoamento desbastado

Na Tabela 4 são apresentadas as estimativas dos parâmetros dos modelos ajustados e algumas estatísticas para o povoamento submetido a desbastes. Pode-se observar, que no critério erro padrão percentual ($Sy.x\%$), os modelos de Bailey-Clutter e de Chapman-Richards foram os que apresentaram os melhores resultados, seguidos pelos modelos de Schumacher, Gompertz e Logístico. Em relação aos critérios de informação de Akaike (AIC) e Bayesiano (BIC), o modelo de Bailey-Clutter apresentou os menores resultados, seguido por Chapman-Richards, Schumacher, Gompertz e Logístico.

Tabela 4 - Parâmetros e estatísticas obtidos nos ajustes dos modelos do povoamento de eucalipto submetido a desbastes.

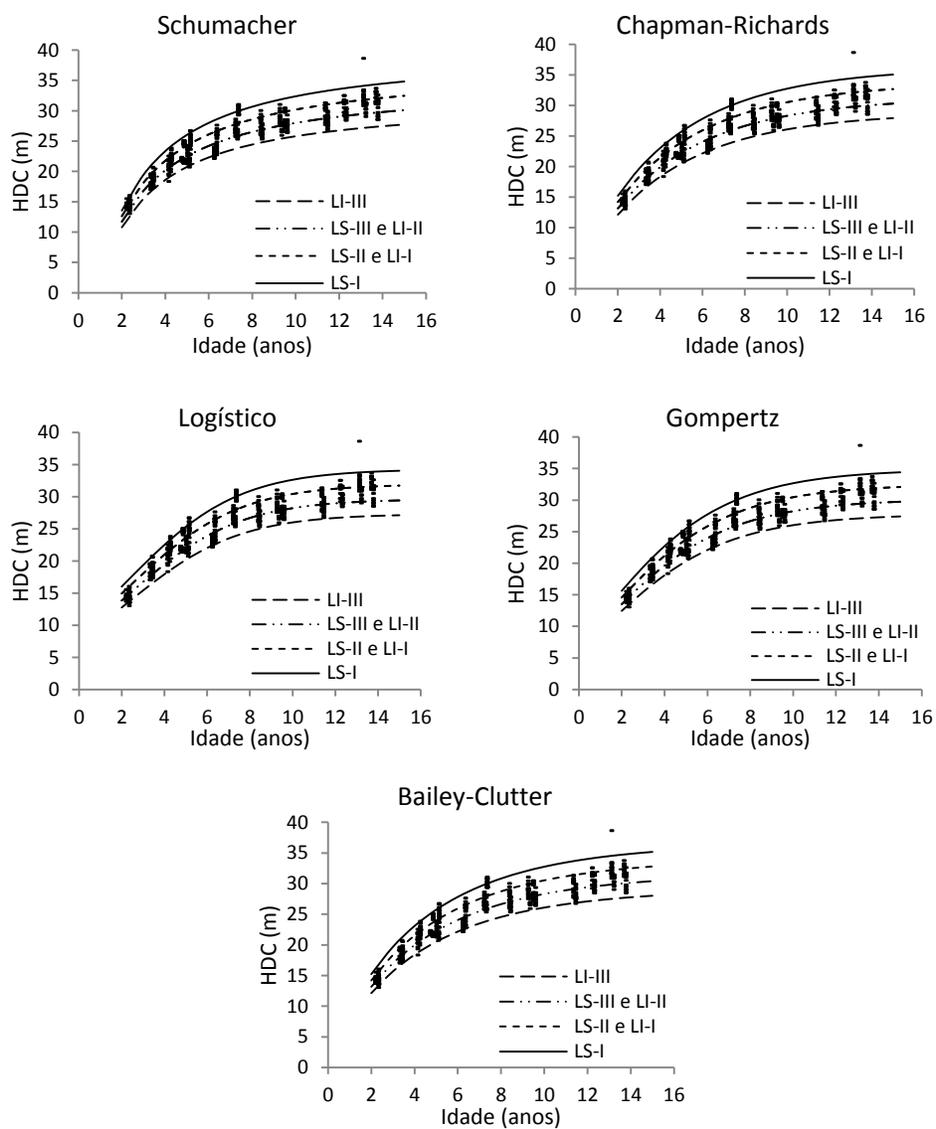
Modelo	Parâmetros			Estatísticas		
	ϕ_0	ϕ_1	ϕ_2	Sy.x %	AIC	BIC
Schumacher	36,02132	-2,18073	-	5,89	2017,88	2030,86
Chapman-Richards	32,25878	-0,21669	0,829540	5,86	2014,79	2032,11
Logístico 3p	30,83456	2,33973	2,567136	6,14	2066,63	2083,95
Gompertz 3p	31,26011	0,40731	0,313227	5,99	2040,33	2057,65
Bailey-Clutter 3p	32,60271	-0,29049	0,88761	5,85	2012,48	2029,79

Nessa abordagem, para a construção das curvas de índice de local, os limites das classes variaram entre 23,5 e 29,5 m com 2 m de amplitude (Figura 5).

É possível verificar a pouca variação entre o comportamento assintótico dos modelos. Porém essa variação é ainda menor que no povoamento não desbastado, pois no geral, todos os modelos se ajustaram bem ao comportamento dos dados. Este fato pode estar relacionado à maior homogeneidade apresentada por povoamentos desbastados, diferente de povoamentos de maior densidade onde há maior variabilidade das características dendrométricas. Além disso, as unidades amostrais desse povoamento estão localizadas em áreas de menor variabilidade de sítio, comparadas com as do povoamento não desbastado.

Assim sendo, os modelos de Bailey-Clutter e de Chapman-Richards foram os que melhor acompanharam a tendência das alturas dominantes observadas para o povoamento submetido a desbaste, abrangendo a grande maioria dos dados.

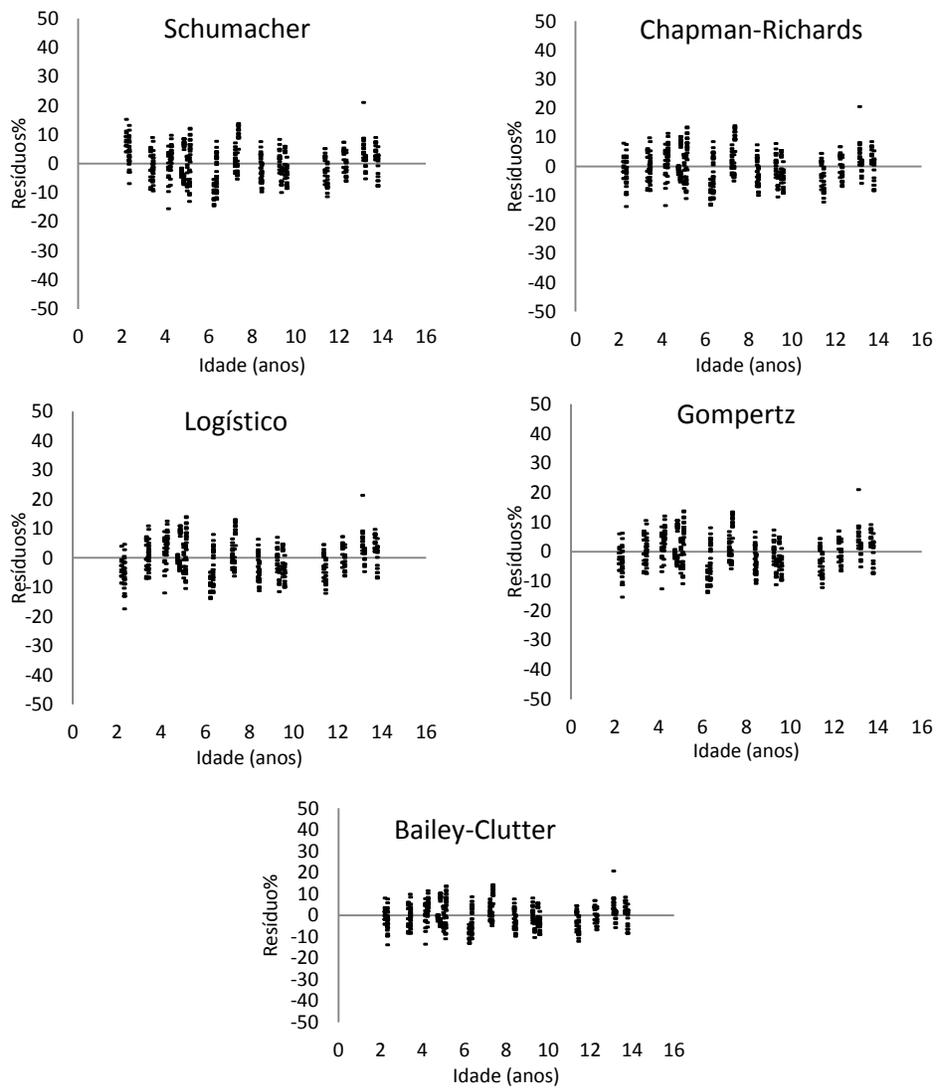
Figura 5 - Curvas de índices de local e dispersão das alturas dominantes observadas para os modelos ajustados na base de dados do povoamento de eucalipto desbastado. Em que: LS e LI (limite superior e inferior); I, II, III (sítios I, II e III).



O modelo de Schumacher apresentou tendência a subestimar os valores de altura dominante nas menores idades, e os modelos Logístico e Gompertz

apresentaram tendência a superestimar as alturas dominantes nessas mesmas idades. Em geral, os modelos de Bailey-Clutter e de Chapman-Richards apresentaram dispersão mais homogênea em relação aos demais (Figura 6).

Figura 6 - Dispersão dos erros relativos percentuais em função da idade para os modelos ajustados na base de dados do povoamento de eucalipto submetido a desbastes.



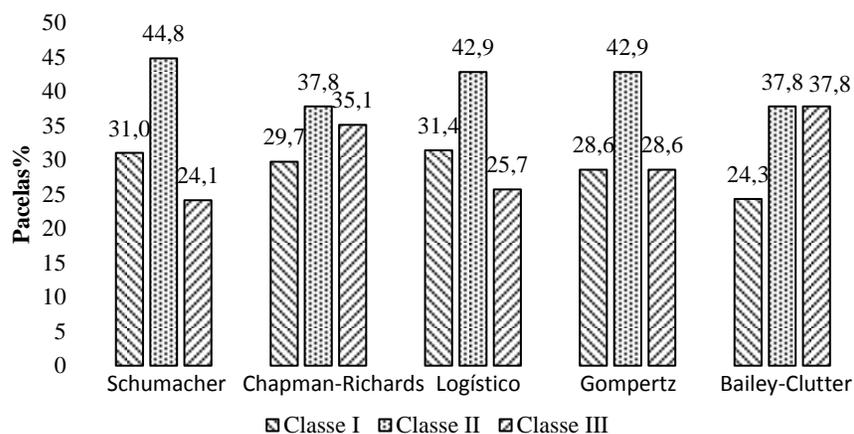
Nessa abordagem, para o teste da estabilidade das parcelas (Tabela 5) os modelos de Gompertz e Chapman-Richards obtiveram os menores valores com 193 e 194 mudanças de classe, respectivamente. Em geral, as curvas abrangeram mais de 70% das parcelas em todo decorrer do tempo, com exceção do modelo de Schumacher com 60,42% de parcelas dentro dos limites estabelecidos pelas curvas.

Nos gráficos nota-se que houve um desbalanço em relação a quantidade de parcelas por classe (Figura 6), em que os modelos de Bailey-Clutter e de Chapman-Richards apresentaram valores próximos principalmente entre as classes intermediária e a menos produtiva. Como o povoamento foi desbastado, a princípio, a tendência a normalidade pode não ser atendida, devido a retirada de indivíduos em todas as classes, causando um desequilíbrio na estrutura.

Tabela 5 - Número de parcelas abrangidas pelas curvas em todo o decorrer do tempo (absoluto e percentual), valor da estabilidade, e número de parcelas (absoluto e percentual) para cada equação ajustada para o povoamento desbastado.

Modelos	Nº parcelas	%	Estabilidade	I	II	III	I%	II%	III%
Schumacher	29	60,42	167	9	13	7	31,0	44,8	24,1
Chapman-Richards	37	77,08	194	11	14	13	29,7	37,8	35,1
Logístico	35	72,92	202	11	15	9	31,4	42,9	25,7
Gompertz	35	72,92	193	10	15	10	28,6	42,9	28,6
Bailey-Clutter	37	77,08	203	9	14	14	24,3	37,8	37,8

Figura 7 - Porcentagem de parcelas pertencentes a cada classe de acordo com a classificação das equações analisadas.



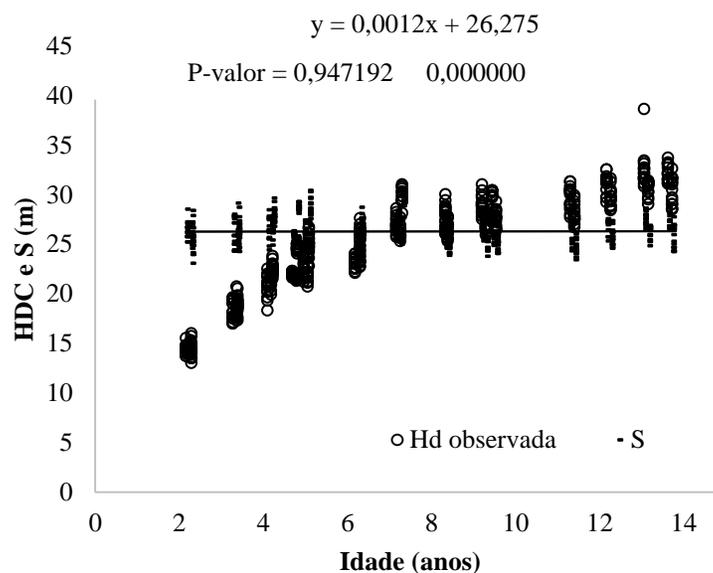
Também para o povoamento desbastado todos os modelos se mostraram eficientes e geraram bons ajustes. Dentre estes, o modelo de Chapman-Richards foi o selecionado, por apresentar melhor consistência em relação à dispersão dos dados observados, resultados estatísticos satisfatórios e dispersão residual homogênea e não tendenciosa.

Ao gerar a linha de tendência dos valores de índice de local (S) (Figura 8) é possível perceber o mesmo comportamento que na base sem desbaste, onde há estabilidade do índice de local no tempo. Isso pode ser comprovado, por meio dos valores obtidos no ajuste, em que o coeficiente angular apresenta valor muito próximo de zero e não significativo, enquanto o intercepto corresponde a um valor muito próximo da média e é altamente significativo.

Na Figura 8 é possível evidenciar que o fato de se trabalhar com dados provenientes de povoamento desbastado, não modifica os valores de altura dominante nas maiores idades, conforme já retratado em estudos como Aguiar et al. (1995), Sullivan et al. (2006) e Silva (2012). O desbaste não afetou o

crescimento dessa variável, mantendo uma tendência contínua. Outro aspecto relevante é que o desbaste foi realizado por baixo, com a retirada dos indivíduos suprimidos, sem muita interferência no estrato superior do povoamento, onde estão presentes as árvores dominantes e codominantes.

Figura 8 - Comportamento da altura dominante e do índice de sítio (S) no decorrer do tempo para o povoamento de eucalipto submetido a desbaste.



3.3 Classificação pela modelagem da trajetória longitudinal dos dados

A partir do cálculo da suficiência amostral (Tabela 6) foram obtidos os números de parcelas necessárias para representar cada grupo, sendo que para o grupo 35, o resultado foi muito próximo de zero, provavelmente porque nesse grupo há apenas três parcelas e os valores são próximos, gerando uma menor variabilidade e, conseqüentemente, menor número de parcelas necessárias para

representá-lo. Porém, para que seja possível a comparação entre os grupos, foram utilizadas todas as três parcelas pertencentes a esse grupo, e o restante conforme calculado.

Tabela 6 -Suficiência amostral para representar as parcelas pertencentes a cada grupo para gerar a análise do morfismo dos dados, considerando um erro admissível igual a 5%.

Grupo	Média	CV%	n
20	28,83	5,1001	4
25	27,81	5,0316	4
30	32,12	4,1337	3
35	35,80	0,7655	0

Na tabela 7 estão apresentados os parâmetros ajustados por grupo a partir do modelo de Schumacher. De acordo com a interpretação dos parâmetros, é possível perceber que o β_0 representa a assíntota para cada grupo, pois quando a idade tende ao infinito, a altura dominante irá corresponder ao valor do β_0 , ou seja, equivale ao valor máximo a ser atingido em altura dominante e codominante média dentro de cada grupo.

Tabela 7 -Parâmetros ajustados utilizando o modelo de Schumacher para os quatro grupos de altura dominante considerados.

Grupo	Parâmetros	
	β_0	$\beta_1(1/D)$
20	30,25327	-1,61066
25	39,03024	-2,35696
30	41,44964	-2,23225
35	47,67935	-2,27742

O teste de comparação entre os parâmetros (Tabela 8) não apontou presença de polimorfismo entre as curvas geradas por grupo, isto é, não houve

diferença entre os valores de β_1 . Foi obtida diferença estatística apenas entre os valores de β_0 , com excessão dos grupos 25 e 30, porém, essa diferença é esperada, uma vez que o valor desse parâmetro aumenta com o aumento do sítio, ou seja, sítios mais produtivos atingem maiores valores em alturas dominantes e codominantes.

Tabela 8 - Valor calculado da estatística Z comparando os parâmetros β_0 e β_1 entre todos os grupos.

β_0				
Grupos	20	25	30	35
20	-	3,03*	3,37*	5,52*
25		-	0,76 ^{ns}	2,90*
30			-	1,90*
β_1				
Grupos	20	25	30	35
20	-	1,22 ^{ns}	0,71 ^{ns}	0,89 ^{ns}
25		-	0,47 ^{ns}	0,37 ^{ns}
30			-	0,13 ^{ns}

Nota: O valor de Z crítico considerando um intervalo de 95% é igual a 1,65.

Ao verificar as quatro curvas obtidas por cada modelo (Figura 9) é possível perceber um leve cruzamento gerado pela curva do grupo 20 em relação as demais. Esse comportamento ocorre nas menores idades e se estabiliza com o tempo. Tal fato pode ser explicado pela interferência dos tratos silviculturais no crescimento da floresta, como a adubação, que interfere principalmente no desenvolvimento inicial das árvores, promovendo um ambiente mais propício ao crescimento até que o povoamento se estabeleça. Enquanto as raízes se desenvolvem na parte superficial do solo, em todos os sítios, os tratamentos foram os mesmos, logo os efeitos da capacidade produtiva do local ainda não

estão evidentes, somente com o passar do tempo estes efeitos se manifestam. Como os inventários florestais são iniciados desde os 2 anos, os dados iniciais podem influenciar o ajuste e gerar o cruzamento entre as curvas.

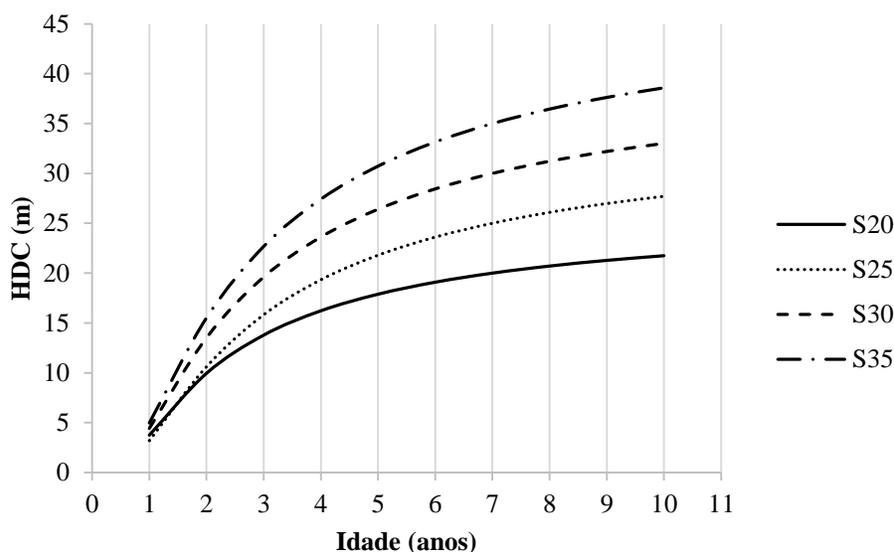
Além disso, a relação funcional que estima a altura média das árvores dominantes e codominantes tem como variável independente, apenas o fator idade, o qual não é o único influente no crescimento em altura. Dessa forma, é relevante que se avalie outros fatores com influência na capacidade produtiva do local, como por exemplo, material genético e tipo de solo.

Estes fatores são importantes principalmente quando se tratam de curvas polimórficas, pois todas envolvem uma ou mais variáveis além da hdc e idade (CLUTTER et al., 1983).

Como exemplo, pode-se citar o trabalho de Bellote e Dedecek (2006), em que foi analisado o efeito das propriedades físicas e químicas do solo na produtividade do *Pinus taeda*, plantado em diferentes tipos de solo e ritmos de crescimento. Foram coletados dados para análise química e física do solo, comparando as variações de cada fator, em cada sítio, e verificaram que a água disponível no solo e a resistência do solo à penetração das raízes afetam o crescimento de *Pinus taeda*, causando variação do diâmetro a altura do peito (DAP) e na altura das árvores, respectivamente. A partir disso, os autores propuseram alternativas silviculturais que gerem aumento de produtividade como poda e desbaste, fertilização e descompactação do solo.

Com a percepção da influência do solo no crescimento das árvores torna-se relevante considerá-la como uma das variáveis associadas ao sítio, buscando gerar curvas que representem melhor o padrão de desenvolvimento em hdc, uma vez que o solo interfere na retenção de água, disponibilidade de nutrientes, tendência a erosão, dentre outros atributos que interferem na estabilidade e assimilação de nutrientes pelas árvores.

Figura 9 - Curvas geradas pelos 4 modelos ajustados para cada grupo.

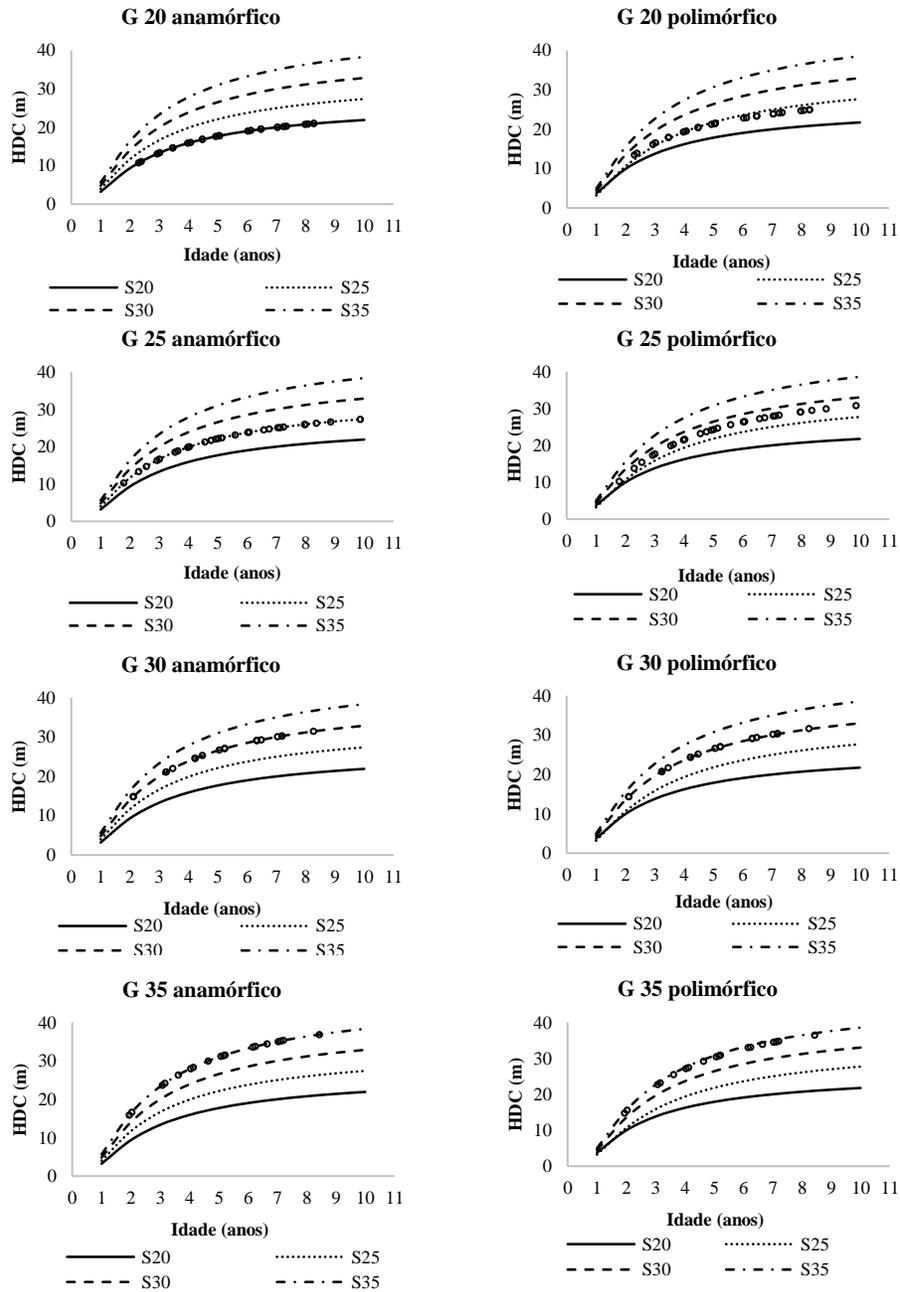


Por meio da análise gráfica da trajetória das parcelas aleatorizadas por grupo (Figura 10), percebeu-se que o ajuste anamórfico possui tendência a subestimar os valores de altura dominante em relação ao polimórfico para os grupos 20 e 25, mesmo não havendo presença de polimorfismo entre eles, enquanto nos demais grupos, as estimativas apresentaram valores muito próximos entre si.

As estimativas do modelo polimórfico nos grupos de menor capacidade produtiva (20 e 25) foram sempre maiores em relação aos grupos das classes mais produtivas (30 e 35), para o grupo 35, o ajuste anamórfico gerou estimativas superiores ao ajuste polimórfico, e para o grupo 30, a maior parte das estimativas geradas pelo modelo anamórfico foram maiores que o ajuste polimórfico. A subestimativa nos grupos de menor produtividade pode estar relacionada ao fato de que, ao serem geradas curvas anamórficas, o ajuste representa uma curva média de todo o conjunto de dados, que se desloca em

função dos limites definidos para cada classe. Portanto, corre-se o risco de não captar a variabilidade em todos os níveis de produtividade, ao passo que, o ajuste por grupo, pode gerar estimativas mais precisas, uma vez que engloba dados com menor variabilidade em relação a curva média anamórfica.

Figura 10 - Trajetória das parcelas por grupo para o ajuste anamórfico e polimórfico.



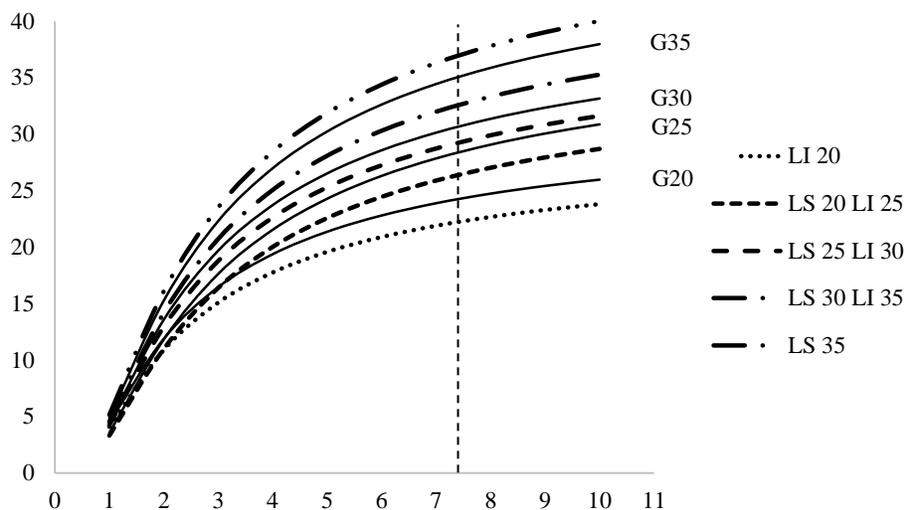
3.4 Definição da amplitude de classe para o ajuste da trajetória longitudinal dos dados

A amplitude das classes de sítio é definida empiricamente pelos engenheiros florestais, porém, biologicamente, pode ser que algumas classes possuam amplitudes menores ou maiores de acordo com a produtividade, fazendo com que o intervalo não seja constante. Dessa forma, ao utilizar o ajuste polimórfico, as classes podem ser definidas de outra forma, conforme a figura 11, onde estas foram obtidas a partir da altura dominante e codominante média esrimada na idade de referência (7 anos) em cada grupo.

No grupo 20 a hdc estimada foi de 25,89 m e no grupo subsequente (25) a hdc é de 27,85 m. Portanto existe uma diferença de 3,84 m (aproximadamente 4 m) entre elas, logo a amplitude de classe para o grupo 20 será de 4 m, partindo de 21,89 a 25,89, restando 1,96 m até o grupo 25. Entre os grupos 25 e 30, a diferença foi de 2,28 m (aproximadamente 2 m), portanto a amplitude dessa classe foi de 25,89 m a 28,73 m (2,96 m), restando 1,28 m até o grupo 30. A diferença de hdc entre o grupo 30 e 35 foi igual a 4,31 m (aproximadamente 4 m) o que define o limite superior de 2 m acima da curva média do grupo 35, gerando uma amplitude equivalente a 4,31m.

De acordo com Clutter et al. (1983), as equações de índice de sítio são classificadas em função da natureza das curvas geradas por elas. Nas curvas anamórficas, a altura estimada em determinada idade é uma proporção constante da altura estimada por outra curva nessa mesma idade. Portanto, o uso de intervalos constantes entre as classes, se justifica. Porém, em curvas polimórficas, ou ajustadas por grupo, com ou sem cruzamento, não há relação de proporcionalidade entre as curvas (CLUTTER et al., 1983). Isto pode indicar a possibilidade de uso de intervalos de classe diferentes de acordo com a produtividade de cada grupo e o comportamento das curvas na idade de referência.

Figura 11 - Definição das classes de sítio para o ajuste polimórfico a partir da altura dominante na idade de referência (7 anos). LI (limite inferior), LS (limite superior).



Na definição das curvas que delimitaram as classes (Tabela 9), as maiores amplitudes foram nos sítios de menor e maior produtividade (aproximadamente 4 m) e nas classes intermediárias as amplitudes foram menores.

Tabela 9 - Intervalo de classe obtidos para os grupos.

Grupos	Intervalo (m)		Índice de sítio (m)	Amplitude (m)
35	36,3	31,99	34,15	4,31
30	31,99	28,73	30,36	3,26
25	28,73	25,89	27,31	2,84
20	25,89	21,89	23,89	4,00

Vale frisar que análises dessa natureza são importantes para entender a trajetória polimórfica dos dados, que só é possível por meio do uso de dados

longitudinais, ou seja, remedições ao longo do tempo. Trata-se de uma fonte de dados com muito mais possibilidades de uso que medidas temporárias e, embora seja mais onerosa de se obter, é o que permite fazer inferências acerca do morfismo dos dados.

Além disso, quando há disponibilidade de dados remedidos no tempo, a hdc pode também ser predita diretamente, por meio da aproximação da taxa instantânea de crescimento em altura (BURKHART; TOMÉ, 2012).

4 CONCLUSÕES

A partir dos ajustes dos modelos biológicos testados, foi possível concluir que o modelo de Chapman-Richards foi o que melhor se ajustou às duas bases de dados, com e sem desbaste, apresentando curvas mais apropriadas para o comportamento apresentado pela variável altura dominante.

O desbaste por baixo, não afeta o crescimento em altura dominante.

O uso de remedições no tempo é necessário para que se realize a análise da trajetória longitudinal dos dados, a partir da qual pode ser verificada a tendência do crescimento das árvores em altura dominante e codominante, auxiliando na adoção da técnica que melhor represente o padrão de crescimento do povoamento.

A trajetória das parcelas estimada pelo método da curva-guia pode gerar sub ou superestimativas dos valores de altura dominante.

Para o ajuste polimórfico, as amplitudes das classes de sítio podem ser definidas de acordo com as alturas dominantes estimadas pelas curvas, na idade de referência, para cada grupo, gerando amplitudes mais consistentes de acordo com a produtividade de cada local.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, I. B. de; VALERI, S. V.; SPINELLI, P.; SARTORI FILHO, A.; PIRES, C. A. de M. Efeito de intensidades de desbaste sobre o crescimento em altura e diâmetro de *Eucalyptus citriodora* Hook. **IPEF**, Piracicaba, n. 48/49, p. 1-7, 1995. Disponível em: <<http://ipef.br/publicacoes/scientia/nr48-49/cap01.pdf>> Acesso em: 27 abr. 2016.
- BELLOTE, A. F. J.; DEDECEK, R. A. Atributos físicos e químicos do solo e suas relações com o crescimento e a produtividade do *Pinus taeda*. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 53, p. 21-38, 2006.
- BETTINGER, P.; BOSTON, K.; SIRY, J. P.; GREBNER, D. L. **Forest Management and Planning**. [s.l: s.n.], 2009.
- BILA, J. M.; SANQUETTA, C. R.; MACHADO, S. do A. Classificação de sítios com base em fatores edáficos para *Pinus caribaea* var, *hondurensis* na região de Prata, Minas Gerais. **Floresta**, Curitiba, v. 42, n. 3, p. 465–474, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5380/rf.v42i3.19014>>. Acesso em: 27 abr. 2016.
- BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. *Modeling Forest Trees and Stands*. New York: Springer & Science Business. 2012; 457 p. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-90-481-3170-9>>. Acesso em: 10 abr. 2016.
- CALEGARIO, N.; DANIELS, R. F.; MAESTRI, R.; NEIVA, R. Modeling dominant height growth based on nonlinear mixed-effects model : a clonal *Eucalyptus* plantation case study, **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 204, n. 1, p. 11–20, 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037811270400578X>>. Acesso em: 27 abr. 2016.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. Viçosa: UFV, 2013. 650 p.
- CARRERO, O.; JEREZ, M.; MACCHIAVELLI, R.; ORLANDONI, G.; STOCK, J. Ajuste de curvas de índice de sitio mediante modelos mixtos para plantaciones de *Eucalyptus urophylla* en Venezuela. **Interciencia**, Caracas, v. 33, n. 4, p. 265-272, 2008. Disponível em:

<http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442008000400007&lng=es&nrm=iso&tlng=es>. Acesso em: 27 abr. 2016.

CLUTTER, J. L.; FORTSON, J. C.; PIENAAR, L. V.; BRISTER, G. H.; BAILEY, R. L. **Timber management**: a quantitative approach. New York: John Wiley& Sons, 1983. 333 p.

DIAS, A. N.; LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; RODRIGUES, F. L. Avaliação de métodos de ajuste de curvas de índices de local em povoamentos de eucalipto desbastados. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 5, p.741-747, 2005. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/0D/rarv/v29n5/a09v29n5.pdf>>. Acesso em: 27 abr. 2016.

FONTES, L.; BONTEMPS, J.D.; BUGMANN, H.; VAN OIJEN, M.; GRACIA, C.;KRAMER, K.;LINDNER, M.; RÖTZER, T.; SKOVSGAARD, J. P. Models for supporting forest management in a changing environment. **Agroforestry Systems**, 19, p, 8-29, 2010. Disponível em: <http://nora.nerc.ac.uk/13066/1/Fontes-etal2010_ForestSystems19_8-29.pdf>. Acesso em: 27 abr. 2016.

MACHADO, S.A.; OLIVEIRA, E.B. de; CARPANEZZI, A.A.; BARTOSZECK, A.C.P.S. Classificação de sítio para bracatingais na região metropolitana de Curitiba. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 38, p. 12-28, 1997. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPF-2009-09/4932/1/machado.pdf>>. Acesso em: 29 de abr. 2016.

MIGUEL, E. P.; ENCINAS, J. I.; REZENDE, A.V.; FERREIRA, J. C. S.; AGUIAR, G.P. Classificação de sítio para plantios de *Eucalyptus urophylla* em Niquelândia, estado de Goiás. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 7, n. 12, p. 1-11, mai. 2011. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/10232/1/ARTIGO_Classifica%C3%A7%C3%A3oPlantios.pdf>. Acesso em: 27 abr. 2016.

NOGUEIRA, G. S.; MARSHALL, P. L. ; LEITE, H. G.; CAMPOS, J. C. C. Thinning Intensity and Pruning Impacts on Plantations in Brazil. **International Journal of Forestry Research**, p. 1-10, 2015.

PEGO, M. F. F.; ASSIS, A. L. de; CABACINHA, C. D. Classificação de sítios florestais em povoamentos de eucalipto na microrregião de Salinas, Minas Gerais. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 11, n. 1, p. 1-5, jun. 2015. Disponível em: <<http://www.conhecer.org.br/enciclop/2015b/agrarias/Classificacao%20de%20sitio.pdf>>. Acesso em: 27 abr. 2016.

RETSLAFF, F. A. de S.; FIGUEIREDO FILHO, A.; DIAS, A.N.; BERNETT, L.G.; FIGURA, M.A. Curvas de sítio e relações hipsométricas para *Eucalyptus grandis* na região dos campos gerais. Paraná, **Cerne**, Lavras, v. 21, n. 2, p. 219–225, jan. 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-77602015000200219&lng=pt&nrm=iso&tlng=en>. Acesso em: 27 abr. 2016.

SAKAMOTO, Y.; ISHIGURO, M.; KITAGAWA, G. **Akaike information criterion statistics**. Dordrecht: D. Reidel, 1986. 290 p.

SANTANA, C.; MELLO, A. A. de; EISFELD, R. de L.; SANQUETTA, C. R. Sistema de equações para simulação do crescimento e da produção em povoamentos de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, sem desbaste baseado no modelo de Clutter. **Ambiência**, Guarapuava, v. 1, n. 2, p. 239-256, 2005. Disponível em: <<http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=DJ2012080364>>. Acesso em: 13 maio 2016.

SANTOS, F. L. dos. **Regulação da produção de floresta de eucalipto submetida a desbaste e destinada a multiprodutos**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.

SILVA, J. V. **Influência do desbaste e da fertilização na produção de um povoamento de eucalipto**. 2012, 49 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, MG, 2012.

SULLIVAN, T. P.; SULLIVAN, D. S.; LINDGREN, M. F.; RANSOME, D. B. Long-term responses of ecosystem components to stand thinning in young lodgepole pine forest, III, Growth of crop trees and coniferous stand structure. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 228, n. 1-3, p. 69-81, 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112706001356>>. Acesso em: 27 abr. 2016.

**ARTIGO 2 - EMPREGO DO MODELO DE CLUTTER PARA
PROGNOSE DO CRESCIMENTO E PRODUÇÃO EM POVOAMENTOS
DE EUCALIPTO DESBASTADO E NÃO DESBASTADO**

Artigo com a formatação baseada na NBR 6022 (ABNT, 2003), conforme orienta o Manual de Normalização de trabalhos acadêmicos da UFLA.

RESUMO

Por meio do acompanhamento e mensuração periódica dos povoamentos florestais, são geradas informações relevantes para as tomadas de decisão na gestão florestal, pois a partir destas, torna-se possível desenvolver modelos de crescimento e produção que permitem prever a produção futura, portanto, a escolha do modelo a ser utilizado, deve atender aos objetivos almejados e gerar estimativas de alta confiabilidade. Dentre os modelos utilizados no Brasil, um dos mais difundidos é o modelo desenvolvido por Clutter (1963). Trata-se de um sistema de equações compatível, consistente e explícito, deste modo, essa flexibilidade permite a aplicação do modelo em povoamentos florestais submetidos a desbaste. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi realizar o ajuste do modelo de Clutter (1963), visando obter a forma do modelo volumétrico mais adequado para estimar o crescimento e a produção de povoamentos de eucalipto desbastado e não desbastado. O ajuste foi realizado pelo método da regressão em dois estágios, gerando o ajuste de 57 relações funcionais possíveis para o modelo volumétrico do sistema. Os ajustes foram avaliados de acordo com a análise gráfica dos erros relativos percentuais (ER%), erro padrão residual ($Sy.x$) e percentual ($Sy.x\%$), correlação entre produções observadas e estimadas e pelo histograma de frequência dos resíduos, além disso, foram montadas tabelas de produção para analisar a idade ótima de corte estimada. Ao utilizar o modelo selecionado, houve ganho em precisão das estimativas para as duas bases de dados, comprovando a importância de sempre verificar a forma do modelo de Clutter que seja mais adequada e que apresente consistência biológica. O modelo de Clutter apresenta flexibilidade e consistência biológica para gerar estimativas de produção em volume e área basal, em povoamentos submetidos a desbaste, porém, ainda existe possibilidade de melhora das estimadas geradas pelo sistema, a partir da alteração da equação de área basal, que tem apresentado inconsistências.

Palavras-chave: Modelo de Clutter (1963). Ajuste em dois estágios. Sistema de equações.

ABSTRACT

By means of periodic monitoring and measurement of forest stands, information relevant to decision making in forest management is generated, since from these, it becomes possible to develop models of growth and production that allow predicting future production, so the choice of model to be used, must meet the desired objectives and generate estimates of high reliability. Among the models used in Brazil, one of the most widespread is the model developed by Clutter (1963), it is a compatible, consistent and explicit system of equations, so this flexibility allows the application of the model in forest stands subject to thinning. In this context, the purpose of this study was to fit the Clutter model (1963) to obtain the most suitable volumetric model to estimate the growth and production of thinned and unthinned eucalyptus stands. The adjustment was performed by the two-stage regression method, generating the adjustment of 57 possible functional relationships for the system volumetric model. The fitting were evaluated according to the graphical analysis of percentage errors (ER%), residual standard error (Sy.x) and percentage (Sy.x%), correlation between observed and estimated yields and histogram of frequency of residues. In addition, production tables were set up to analyze the optimal age of estimated cutting. When using the selected model, there was a gain in the accuracy of the estimates for the two databases, proving the importance of always checking the volumetric system model that is more adequate and presents biological consistency. The Clutter model presents flexibility and biological consistency to generate estimates of volume and basal area production in thinned stands, but there is still a possibility of improving the estimates generated by the system from the alteration of the basal area equation that has presented inconsistencies.

Keywords: Clutter model (1963). Two stages least square. System of equations.

1 INTRODUÇÃO

Na gestão dos povoamentos florestais, é preciso obter informações acerca do crescimento das árvores. Essas informações são base para as tomadas de decisão do manejo florestal, possibilitando as estimativas de aspectos inerentes ao planejamento, como definir o melhor momento para o desbaste e o corte raso, compra e venda de madeira, aquisição de novas áreas, dentre outros. O que torna possível estabelecer tais decisões é a obtenção do volume futuro da floresta, que é estimado por meio dos modelos de crescimento e produção (NASCIMENTO et al., 2015).

O impacto das estimativas de produção geradas por esses modelos, é significativo para a sustentabilidade do empreendimento florestal, uma vez que envolve o atendimento de demandas nacionais e internacionais, além de influenciar os balanços econômicos, especialmente por se tratar de um planejamento a longo prazo. Logo, a escolha do modelo a ser utilizado deve atender aos objetivos almejados e gerar estimativas de alta confiabilidade.

A classificação dos modelos de crescimento e produção varia conforme o detalhamento, sendo povoamento total, distribuição de diâmetros ou árvore individual (CLUTTER et al., 1983). Dentre estes, os modelos em nível de povoamento são os mais estudados e utilizados no Brasil, projetando a produção futura a partir de variáveis mensuradas no povoamento, isto é, o volume é estimado em função da idade, sítio e densidade, e a área basal é estimada em função da idade e índice de sítio. Para estas estimativas, o modelo de Clutter (1963) é o mais empregado (DIAS et al., 2005; GORGENS et al., 2007; CAMPOS; LEITE, 2013).

O modelo desenvolvido por Clutter (1963) é constituído por um sistema de equações, sendo também denominado modelo de densidade variável, permitindo a sua aplicação em povoamentos submetidos a desbaste. A forma do

modelo aplicada pelo autor foi utilizada para povoamentos de *Pinus taeda* L., sendo que as variáveis independentes são a idade, o índice de local, a área basal, e suas combinações, e são selecionadas conforme as estatísticas do ajuste. Assim, o autor definiu a forma reduzida usualmente empregada em diversas pesquisas (SALLES et al., 2012).

Diante disso, com a grande diversidade edafoclimática e fisiográfica existente no Brasil, o comportamento das espécies implantadas será distinto, conseqüentemente, o ajuste do modelo de produção, particularmente o de Clutter (1963), se dará de acordo com o comportamento apresentado pelos dados. Portanto, é fundamental analisá-lo a partir da sua forma original, optando por aquela que compreenda as variáveis significativas, o que possivelmente, aumentará a precisão das estimativas.

Deste modo, o objetivo deste estudo foi realizar o ajuste do modelo de Clutter (1963), testando diferentes combinações do modelo volumétrico, e verificando o ajuste pela interpretação dos dados, para obter a forma do modelo mais adequada para estimar o crescimento e a produção de povoamentos de eucalipto desbastado e não desbastado.

2 METODOLOGIA

2.1 Descrição dos dados

Um primeiro conjunto longitudinal (remedido ao longo do tempo), de dados para este estudo, foi obtido com inventário florestal contínuo, conduzido em povoamentos de eucalipto no Município de Virginópolis, na região Centro Oeste de Minas Gerais, o clima é do tipo cwa – clima de inverno seco e verão chuvoso. A temperatura do mês mais frio é inferior a 18 graus e a do mais quente superior a 22 graus. O relevo é fortemente ondulado, com presença de afloramentos rochosos e os solos predominantes são latossolos e cambissolos, com Latitude 18°49'5" Sul e Longitude 41°41'46" oeste, com altitude de 743 m. O povoamento foi conduzido em regime de alto fuste, com espaçamento inicial de 3,0 x 3,0 m², os dados foram obtidos entre 2006 e 2013, em 295 unidades amostrais retangulares, com cerca de 300 m² de área, entre 3 a 8 remedições. A intensidade amostral aproximada foi de 1:10 (uma parcela a cada 10 hectares), ou seja, os povoamentos ocupam uma área de aproximadamente 3000 hectares e são manejados para produção de madeira para celulose.

Um segundo conjunto de dados foi obtido de um experimento de desbaste no nordeste da Bahia, em povoamentos do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, que foi instalado em setembro de 1995, quando os povoamentos estavam com 27 meses. Esse experimento foi instalado em três locais, com diferentes capacidades produtivas: Bonfim (11°52' S e 38°32' O, 285m de altitude e 900 mm de precipitação anual média); Tombador (12°03' S e 38°28' O, 290m de altitude e 1100mm de precipitação anual média); e Lagoa do Bu (11°47' S e 37°55' O, 150m de altitude e 1200 mm de precipitação média anual). As unidades amostrais experimentais possuem uma área de 2600 m² com

espaçamento inicial de 3,5 x 2,6 m². O delineamento foi em blocos casualizados, com dois blocos por local e duas repetições por bloco.

Os tratamentos avaliados consistiram na remoção da área basal presente na idade do desbaste, sendo: 20% (T1), 35% (T2), 50% (T3) e 35% mais desrama artificial até uma altura de 6,0 m (T4). O primeiro desbaste foi realizado aos 58 meses de idade, e em seguida aos 142 meses, removendo os indivíduos de menor dimensão. As variáveis mensuradas foram: diâmetro a 1,30m de todas as árvores, altura total de aproximadamente 15 árvores escolhidas aleatoriamente, altura de 5 árvores dominantes por parcela e a qualidade de cada árvore (bifurcação, dominante, normal, colhida ou morta). Mais detalhes sobre o experimento são encontrados em Campos e Leite (2013), Nogueira et al. (2014), Santos (2008) e Dias (2000).

Os métodos e análises apresentados nos itens subsequentes foram aplicados a essas duas bases de dados.

2.2 Ajuste da relação funcional de Clutter

A fim de obter o modelo volumétrico mais eficiente para cada base de dados, foi realizado o ajuste de 57 relações funcionais possíveis para o modelo volumétrico do sistema de equações desenvolvido por Clutter (1963), pois este contém seis variáveis, em que $2^6 = 64$ relações funcionais possíveis, porém, foram desconsideradas as equações com apenas uma variável e a que considera apenas o β_0 , resultando em 57 equações. Portanto, foram ajustadas 57 relações funcionais para o sistema de Clutter (1963) (1) e (4), mantendo a mesma equação de área basal.

A partir dos ajustes, buscando selecionar um sistema biologicamente consistente, foram considerados apenas os sistemas em que todos os parâmetros

foram significativos. Entre estes, foi verificado o erro padrão residual ($Sy.x$) e o coeficiente de determinação (R^2) dos modelos volumétricos.

Analisando os modelos que apresentaram menor erro padrão e maior coeficiente de determinação, foram observados os sinais dos coeficientes, conforme Salles et al. (2012), onde espera-se que os valores dos parâmetros β_1 e β_6 sejam negativos, uma vez que a relação entre a variável y (LnV_2) e as variáveis $\frac{1}{I_2}$ e $S\frac{1}{I_2}$ é decrescente. O sistema escolhido como mais adequado à base de dados foi denominado modelo selecionado, e foi comparado com os sistemas na forma completa (1) e (4) e usual (2) e (4).

Além dessa abordagem, foi também considerado o ajuste do modelo por meio da interpretação dos parâmetros. Partindo do princípio de que a relação da variável y (LnV_2) com o inverso da idade $\frac{1}{I_2}$ é decrescente, espera-se que os demais parâmetros também acompanhem essa tendência, porém lnG_2 tem relação ascendente com a variável y , assim como o sítio (S). Para modificar esta relação e torná-la decrescente, as variáveis lnG_2 e S foram substituídas pelo seu inverso $\left(\frac{1}{ln(G_2)} \text{ e } \frac{1}{S}\right)$. Além dessas variáveis, foi inserida a interação entre $\frac{1}{I_2} \frac{1}{ln(G_2)}$ e $\frac{1}{S} \frac{1}{ln(G_2)}$ (3). Como o índice de sítio não varia com a idade, não foi considerado nenhuma interação com essa variável. Assim sendo, foi ajustado o sistema composto pelas equações (3) e (4), denominado sistema modificado.

Os quatro sistemas obtidos (selecionado, completo, usual e modificado) foram comparados entre si.

$$\begin{aligned} \ln(V_2) = & \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{I_2} + \beta_2 S + \beta_3 \ln(G_2) + \beta_4 \frac{1}{I_2} \ln(G_2) + \beta_5 S \ln(G_2) \\ & + \beta_6 S \frac{1}{I_2} + \varepsilon \end{aligned} \quad (1)$$

$$\ln(V_2) = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{I_2} + \beta_2 S + \beta_3 \ln G_2 + \varepsilon \quad (2)$$

$$\ln(V_2) = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{I_2} + \beta_2 \frac{1}{\ln(G_2)} + \beta_3 \frac{1}{S} + \beta_4 \frac{1}{I_2 \ln(G_2)} + \beta_5 \frac{1}{S \ln(G_2)} + \varepsilon \quad (3)$$

$$\ln(G_2) = \ln(G_1) \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + \alpha_0 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) + \alpha_1 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) S + \varepsilon \quad (4)$$

Em que: V_2 = Volume futuro (m^3/ha); I_1 e I_2 = Idade atual e futura (anos); S = Índice de sítio (metros); G_1 e G_2 = Área basal atual e futura (m^2/ha); \ln = logaritmo neperiano, β_i = Parâmetros da regressão.

A base de dados foi dividida em duas partes, sendo 80% das parcelas para ajuste e 20% para teste.

Por se tratar de um sistema de equações, pode ser que o método dos mínimos quadrados ordinários não seja o mais adequado, pois ao aplicá-lo nesses tipos de equações, os estimadores podem ser inconsistentes, devido a correlação existente entre as variáveis exógenas e os termos de erro (BORDERS, 1989). Logo, foi realizado o teste de Hausman (1978) para verificar qual o método mais adequado entre mínimos quadrados ordinários (OLS), dois estágios (2SLS) ou três estágios (3SLS).

Foi utilizado o *software* R, versão 3.3.1 (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2016), onde foi construído um *script* com todos os procedimentos para ajuste dos sistemas.

Para analisar a consistência dos modelos, quanto à idade ótima de corte e à projeção da área basal e do volume, foi elaborada uma tabela de produção para o povoamento não desbastado, na qual a estimativa da área basal inicial, numa idade inicial de dois anos, foi realizada por meio do ajuste de um modelo exponencial (5) em função do sítio.

$$B_i = \beta_0 * \exp(\beta_1 * S_i^{-1}) + \varepsilon_i \quad (5)$$

Em que: B_i = área basal inicial e S_i = índice de sítio

2.3 Avaliação dos sistemas

Os modelos foram avaliados de acordo com a análise gráfica dos erros relativos percentuais (ER%) (6), erro padrão residual (Sy.x) (7) e percentual (Sy.x%) (8), correlação entre produções observadas e estimadas e pelo histograma de frequência dos resíduos.

$$ER\% = \frac{(y - \hat{y})}{y} * 100 \quad (6)$$

$$Sy.x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y - \hat{y})^2}{n - p - 1}} \quad (7)$$

$$Sy.x\% = \frac{Sy.x}{\bar{y}} * 100 \quad (8)$$

Em que: y = valor observado; \hat{y} = valor estimado; n = número de observações; p = número de parâmetros do modelo; \bar{y} = média dos dados observados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com o teste de Hausman (1978), para as duas bases de dados, os ajustes dos sistemas de equações completo, selecionado e usual devem ser realizados pelo método de mínimos quadrados em dois estágios, enquanto, para o modelo modificado o teste foi não significativo, ou seja, o método de ajuste em mínimos quadrados ordinários pode ser aplicado.

Tabela 1 - Resultado do teste de Hausman (1978) e p-valor para os quatro modelos analisados para os povoamentos desbastado e não desbastado.

Sistemas	Povoamento não desbastado		Povoamento desbastado	
	Teste de Hausman	P-valor	Teste de Hausman	P-valor
Completo	987,33	2,20E-16	117,65	2,20E-16
Selecionado	371,12	1,70E-06	33,687	5,37E-05
Usual	37,078	2,20E-16	29,286	7,73E-06
Modificado	5,82E-08	1	1,67E-08	1

3.1 Povoamento não desbastado

Na Tabela 1 estão representados os sistemas do modelo de Clutter ajustados para o povoamento não desbastado. O primeiro sistema compreendeu o modelo volumétrico completo, no qual foi obtido um erro padrão percentual de 8,58%, porém apenas dois parâmetros foram significativos pelo teste t ($p < 0,05$) e o parâmetro β_1 , associado a I_2^{-1} , não apresentou valor negativo, o que representa inconsistência no ajuste.

Dentre os sistemas ajustados, considerando aqueles em que todos os parâmetros foram significativos, os valores de erro padrão variaram entre 0,0672 e 0,2425 ($\ln(m^3/ha)$), e os valores do coeficiente de determinação estiveram entre 58,07% e 97,63%. Portanto, foi selecionado o modelo volumétrico que

apresentou um erro padrão de 0,0672 ($\ln(m^3/ha)$) e um R^2 igual a 97,63%, em que todos os coeficientes apresentaram sinais conforme o esperado. Neste modelo o erro padrão percentual foi igual a 8,69% pouco maior que o modelo completo e menor que o modelo usual (9,05%), no qual todos os parâmetros foram significativos. O modelo modificado, apresentou o menor valor de $Sy.x\%$ (8,63%), dentre os modelos que apresentaram consistência e todos os parâmetros significativos.

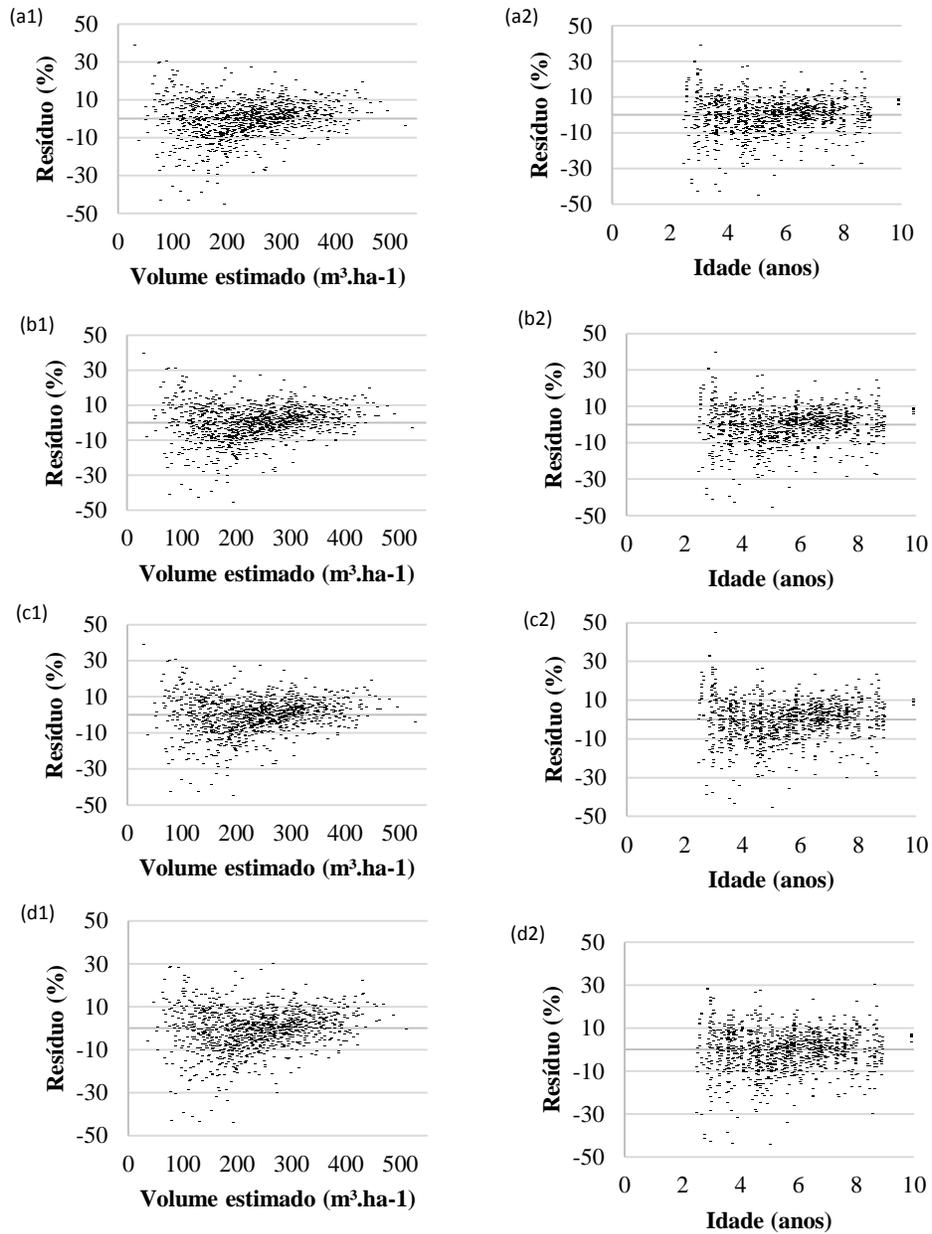
Tabela 2 - Estimativas dos parâmetros dos modelos de volume completo, selecionado, usual e modificado associados aos valores de probabilidade de significância (p-valor) e a estatística erro padrão percentual ($Sy.x\%$) para o povoamento de eucalipto não desbastado.

Parâmetros	Completo	Selecionado	Usual	Modificado		
β_0	-	0,850447 (0,33726)	1,144185 (2,22E-16)	1,458025 (2,22E-16)	-	12,2135 (2,22E-16)
β_1	I_2^{-1}	0,772641 (0,44604)	-	-1,58988 (2,22E-16)	I_2^{-1}	-8,0315 (2,22E-16)
β_2	S	0,030992 (0,2917)	0,024517 (2,22E-16)	0,020217 (2,22E-16)	$\frac{1}{\ln(G_2)}$	-17,6953 (2,22E-16)
β_3	$\ln(B_2)$	1,343695 (4,43E-08)	1,268741 (2,22E-16)	1,199888 (2,22E-16)	$\frac{1}{S}$	-50,2664 (2,22E-16)
β_4	$I_2^{-1}\ln(B_2)$	-0,564430 (1,61E-05)	-0,408758 (9,50E-07)	-	$\frac{1}{I_2} \frac{1}{\ln(G_2)}$	18,5561 (2,22E-16)
β_5	$S\ln(B_2)$	-0,001376 (0,86268)	-	-	$\frac{1}{S} \frac{1}{\ln(G_2)}$	96,8958 (2,22E-16)
β_6	SI_2^{-1}	-0,027345 (0,32141)	-0,016569 (0,046225)	-	-	-
$Sy.x\%$		8,58	8,69	9,05	-	8,63

Com relação à dispersão gráfica dos erros relativos percentuais (Figura 1), foi observado que todos os modelos apresentaram comportamento semelhante, em que houve uma maior dispersão do erro em relação aos menores valores estimados, porém a maior parte dos resíduos se concentraram entre

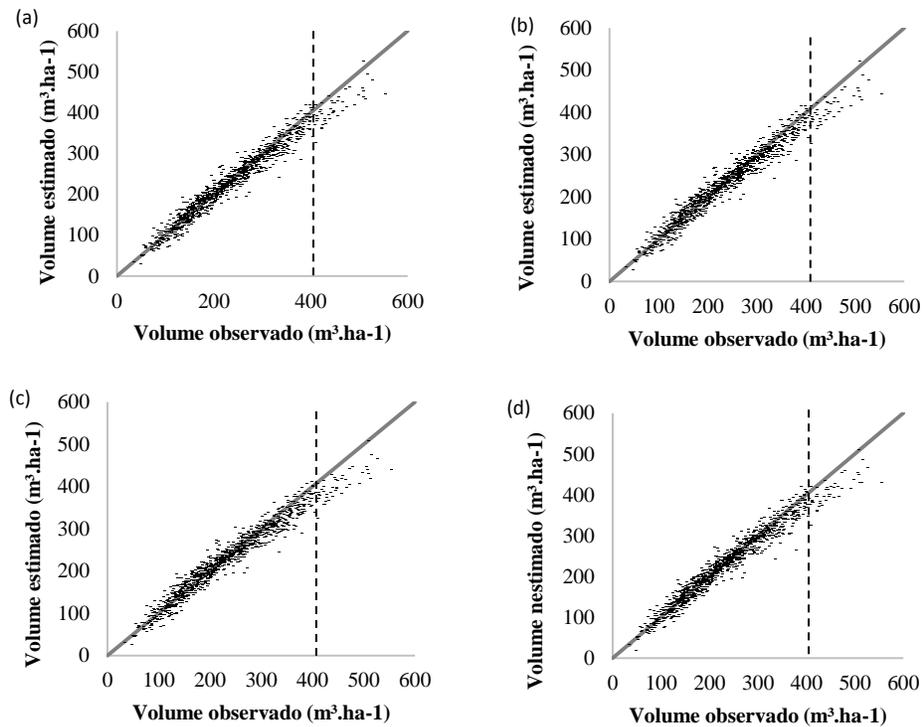
$\pm 10\%$. Na dispersão do resíduo em função da idade, é possível perceber o mesmo desempenho, com um leve desvio nos anos iniciais, onde estes apresentaram tendência em subestimar o volume. Esse comportamento se deve ao fato de que povoamentos com idades menores possuem maiores variações nas características morfológicas, fazendo com que o modelo não consiga captar bem essas mudanças. Apesar disso, o modelo modificado apresentou a dispersão mais homogênea no decorrer do tempo.

Figura 1 - Dispersão dos erros relativos percentuais em função do volume estimado e da idade para os modelos ajustados na base de dados do povoamento de eucalipto não desbastado modelo completo (a); modelo selecionado (b); modelo usual (c) e modelo modificado (d).



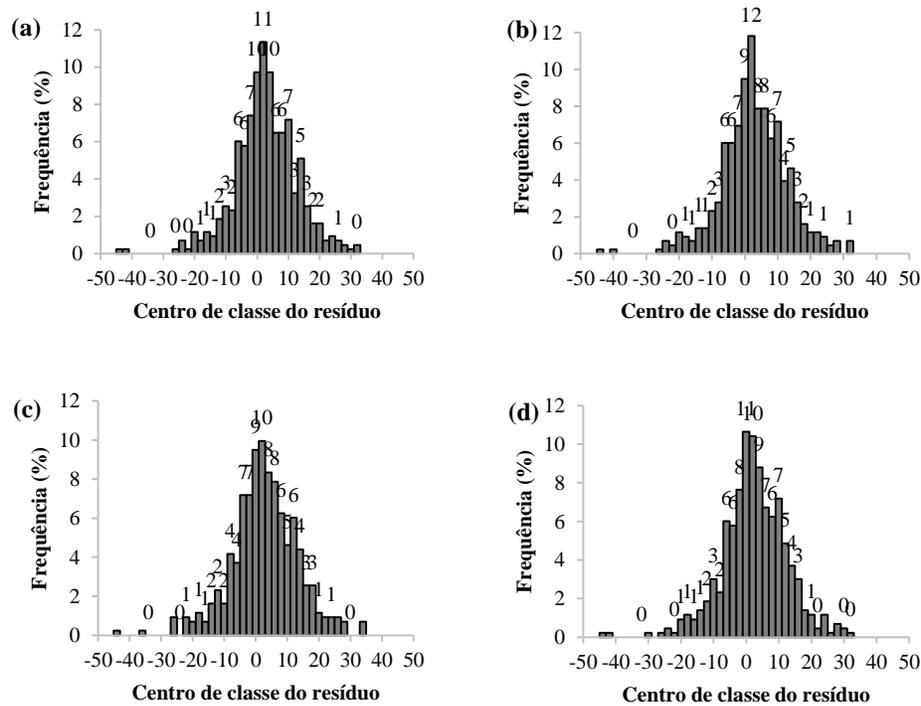
Analisando a correlação entre as produções observadas e estimadas (Figura 2), verifica-se que os modelos se ajustaram bem aos dados, mantendo-os próximos da reta de 45°. Porém, para produções acima de 400 m³.ha⁻¹, os modelos demonstraram uma maior dispersão, com tendência a subestimar os maiores volumes. Este mesmo comportamento foi observado por Soares et al. (2004) no ajuste do sistema de Clutter, utilizando sua forma usual, cujas estimativas para plantios com produção acima de 350 m³ha⁻¹ apresentaram tendência de subestimativa. Possivelmente esse efeito se deve a propensão de aumento da variância do volume, à medida que se aumenta os valores de x , fenômeno comum em muitas relações biológicas, como volume de árvore individual (BURKHART; MARGARIDA, 2012). Apesar dessa ocorrência, a projeção dos modelos não foi afetada, pois a idade técnica de corte estimada ocorreu antes do período onde essa produtividade seria atingida (SORAES et al., 2004).

Figura 2 - Produções observadas e estimadas pelos sistemas para os modelos ajustados na base de dados do povoamento de eucalipto não desbastado, modelo completo (a); modelo selecionado (b); modelo usual (c) e modelo modificado (d).



A Figura 3 mostra os histogramas de frequência dos erros relativos percentuais por classe de erro para os quatro modelos volumétricos. Nota-se que, em geral, as distribuições dos modelos completo, selecionado, usual e modificado possuem tendência aproximadamente normal, com 75%, 75%, 70% e 75% dos resíduos concentrados entre $\pm 10\%$, respectivamente.

Figura 3 - Histograma de frequência dos erros relativos percentuais dos modelos volumétricos ajustados na base de dados do povoamento de eucalipto não desbastado. Modelo completo (a); modelo selecionado (b); modelo usual (c) e modelo modificado (d).



Com base nos sistemas ajustados, foram elaboradas tabelas de produção, considerando três classes de produtividade: $S = 25$; $S = 29$ e $S = 33$ (Tabela 2). Todas as tabelas apresentaram consistência biológica, em que os valores de volume e área basal aumentaram conforme a idade e a classe de produtividade. Os incrementos médios anuais (IMA) seguiram a tendência de crescimento ascendente, até certa idade, quando foi atingido o valor máximo, correspondente a idade técnica de corte. A partir deste ponto, os valores passaram a decrescer, pois o povoamento já atingiu o ponto máximo de crescimento, intensificando a

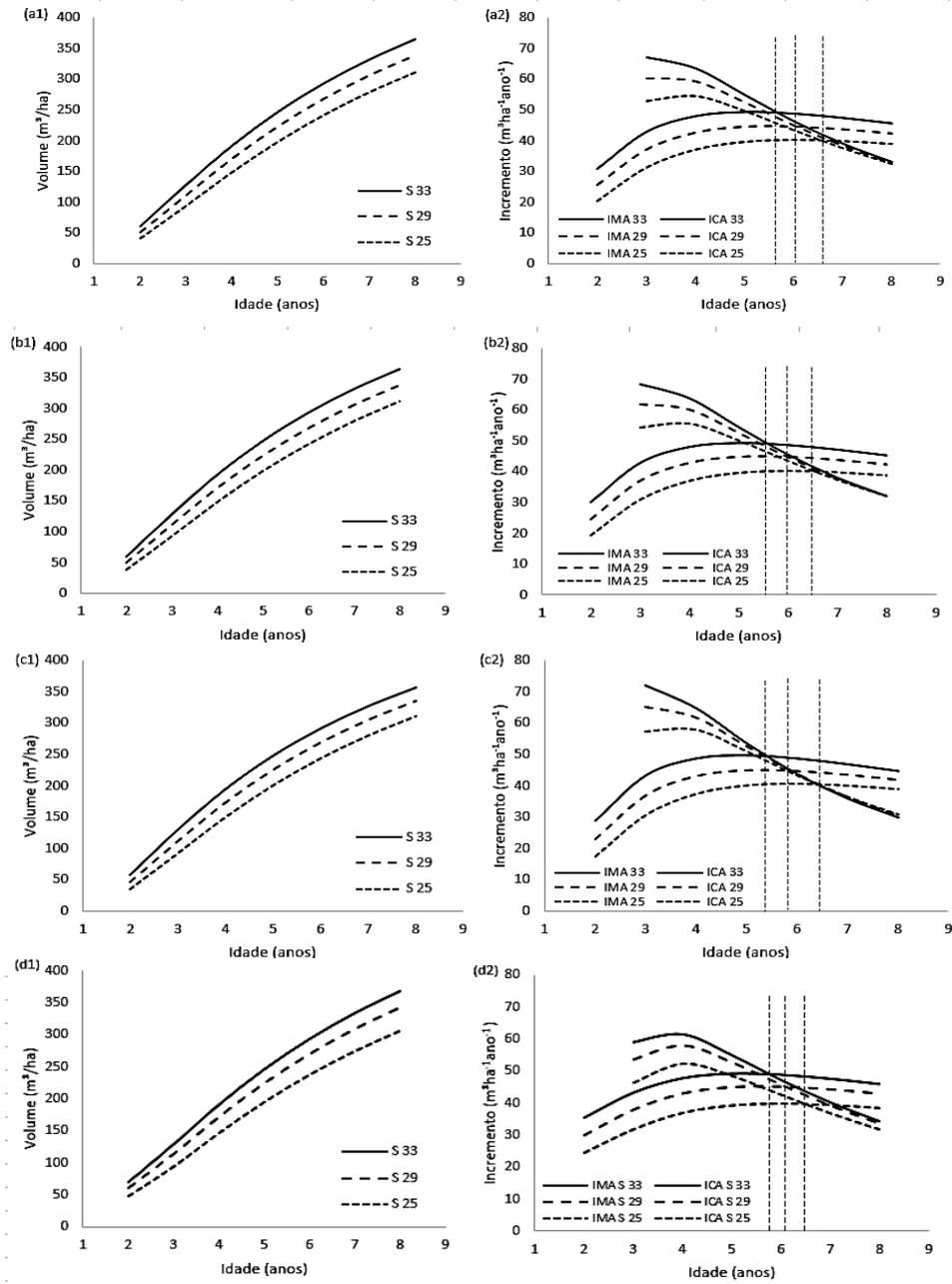
competição e com conseqüente aumento de mortalidade. A tendência dos incrementos correntes anuais (ICA) é de crescimento até o ponto de inflexão da curva de produção e em seguida reduzir. Ou seja, a taxa de crescimento em plantios florestais é maior nos primeiros anos e reduz à medida que se aumenta o grau de ocupação do local e a competição.

Os sistemas completo e modificado resultaram em uma idade ótima de corte de 6 anos para os sítios 25 e 29 e a idade de 5 anos para o sítio 33. Os sistemas selecionado e usual obtiveram o máximo IMA em 6 anos, apenas para o sítio menos produtivo, e em 5 anos para os sítios de produtividade alta e intermediária (Figura 4). É possível verificar ainda, que, em geral, os sistemas apresentaram o mesmo comportamento, discriminando a produtividade por sítio na mesma proporção, variando sempre a idade técnica de corte na classe intermediária.

Tabela 3 - Tabelas de produção para os três sistemas ajustados na base de dados do povoamento de eucalipto não desbastado.

Sistemas	Idade (anos)	Índice de sítio (m)											
		25				29				33			
		Área basal (m ² ha ⁻¹)	Volume (m ³ ha ⁻¹)	IMA (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	ICA (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Área basal (m ² ha ⁻¹)	Volume (m ³ ha ⁻¹)	IMA (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	ICA (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Área basal (m ² ha ⁻¹)	Volume (m ³ ha ⁻¹)	IMA (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	ICA (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)
Completo	2	7,23	40,49	20,25		8,54	50,91	25,45		9,69	61,31	30,66	
	3	13,08	93,43	31,14		14,32	111,24	37,08	60,33	15,26	128,41	42,80	67,10
	4	17,59	147,98	37,00	52,94	18,54	170,55	42,64	59,30	19,15	191,89	47,97	63,48
	5	21,02	197,63	39,53	49,65	21,65	222,97	44,59	52,43	21,94	246,70	49,34	54,81
	6	23,66	241,02	40,17	43,38	24,00	267,90	44,65	44,93	24,03	292,93	48,82	46,23
	7	25,75	278,48	39,78	37,47	25,84	306,16	43,74	38,26	25,64	331,86	47,41	38,93
	8	27,44	310,82	38,85	32,34	27,31	338,84	42,35	32,68	26,91	364,84	45,61	32,98
	Selecionado	2	7,23	38,67	19,34		8,54	49,29	24,64		9,69	60,17	30,09
3		13,08	92,80	30,93	54,13	14,32	110,95	36,98	61,66	15,26	128,66	42,89	68,49
4		17,59	148,18	37,05	55,38	18,54	170,92	42,73	59,97	19,15	192,56	48,14	63,89
5		21,02	198,13	39,63	49,95	21,65	223,39	44,68	52,47	21,94	247,08	49,42	54,53
6		23,66	241,44	40,24	43,31	24,00	267,98	44,66	44,59	24,03	292,67	48,78	45,59
7		25,75	278,61	39,80	37,17	25,84	305,71	43,67	37,73	25,64	330,79	47,26	38,13
8		27,44	310,53	38,82	31,92	27,31	337,78	42,22	32,06	26,91	362,91	45,36	32,12
Usual		2	7,23	34,52	17,26		8,54	45,73	22,87		9,69	57,71	28,85
	3	13,08	91,67	30,56	57,15	14,32	110,81	36,94	65,08	15,26	129,69	43,23	71,98
	4	17,59	149,38	37,34	57,71	18,54	172,49	43,12	61,68	19,15	194,41	48,60	64,73
	5	21,02	200,22	40,04	50,85	21,65	224,95	44,99	52,45	21,94	247,87	49,57	53,46
	6	23,66	243,41	40,57	43,18	24,00	268,51	44,75	43,56	24,03	291,44	48,57	43,57
	7	25,75	279,85	39,98	36,44	25,84	304,70	43,53	36,19	25,64	327,18	46,74	35,74
	8	27,44	310,71	38,84	30,87	27,31	335,00	41,88	30,31	26,91	356,83	44,60	29,65
	Modificado	2	7,23	48,96	24,48		8,54	60,20	30,10		9,69	70,90	35,45
3		13,08	95,22	31,74	46,26	14,32	113,72	37,91	53,52	15,26	129,93	43,31	59,03
4		17,59	147,41	36,85	52,19	18,54	171,58	42,90	57,86	19,15	191,40	47,85	61,47
5		21,02	195,82	39,16	48,40	21,65	224,23	44,85	52,64	21,94	246,34	49,27	54,94
6		23,66	238,37	39,73	42,55	24,00	269,97	44,99	45,74	24,03	293,54	48,92	47,21
7		25,75	275,19	39,31	36,82	25,84	309,24	44,18	39,27	25,64	333,76	47,68	40,22
8		27,44	306,98	38,37	31,79	27,31	342,95	42,87	33,71	26,91	368,10	46,01	34,34

Figura 4 - Gráficos das Curvas de produção e de Incremento Médio e Corrente anual para os quatro sistemas ajustados na base de dados do povoamento de eucalipto não desbastado. Modelo completo (a); modelo selecionado (b); modelo usual (c) e modelo modificado (d).



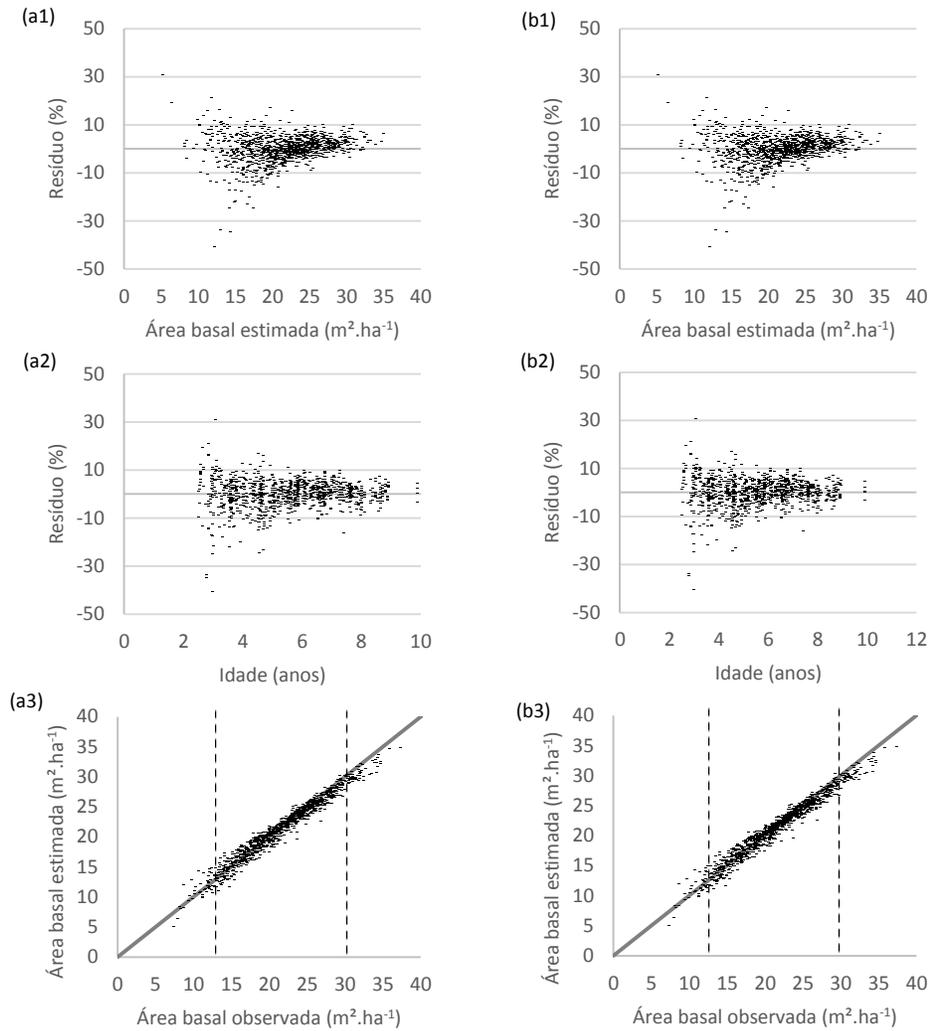
Para o modelo de área basal, os resultados estatísticos foram semelhantes para os modelos completos, selecionado e usual, por se tratar da mesma equação, diferindo do modelo modificado em casas decimais (Tabela 4). Os valores obtidos resultaram em $Sy.x = 4,77\%$ para os demais modelos e $4,95\%$ para o modelo modificado, estes resultados podem ser considerados como satisfatórios em termos de exatidão.

Em relação aos gráficos de dispersão (Figura 5), nota-se que o modelo possui tendência em superestimar áreas basais menores e subestimar áreas basais maiores. Esse comportamento também pode ser observado no gráfico de correlação entre as áreas basais observadas e estimadas, para valores abaixo de $11 \text{ m}^2.\text{ha}^{-1}$ e acima de $30 \text{ m}^2.\text{ha}^{-1}$, conforme destacado na Figura 5. Outros trabalhos, como Castro et al. (2013) e Demolinari et al. (2007), também verificaram esse mesmo comportamento nas estimativas de área basal geradas por esse modelo.

Tabela 4 - Estimativas dos parâmetros do modelo de área basal para os quatro sistemas associados aos valores de probabilidade de significância (p-valor) e a estatística erro padrão percentual ($Sy.x\%$) para o povoamento de eucalipto não desbastado.

Modelos	Sy.x%	$1 - \left(\frac{I_1}{I_2}\right)$	$1 - \left(\frac{I_1}{I_2}\right) * S$
		α_0	α_1
Completo Selecionado Usual	4,77	4,143499 (2,22E-16)	-0,015466 (2,65E-13)
Modificado	4,95	4,1435 (2,22E-16)	-0,01547 (2,65E-13)

Figura 5 - Gráficos de dispersão dos resíduos em função da área basal estimada e da idade e gráfico de correlação entre as áreas basais estimadas e observadas na base de dados do povoamento de eucalipto não desbastado para os modelos completo, selecionado e usual (a) e para o modelo modificado (b).



Um dos problemas apontados como causa das inconsistências nas estimativas é o coeficiente do modelo que se relaciona com o fator sítio (S).

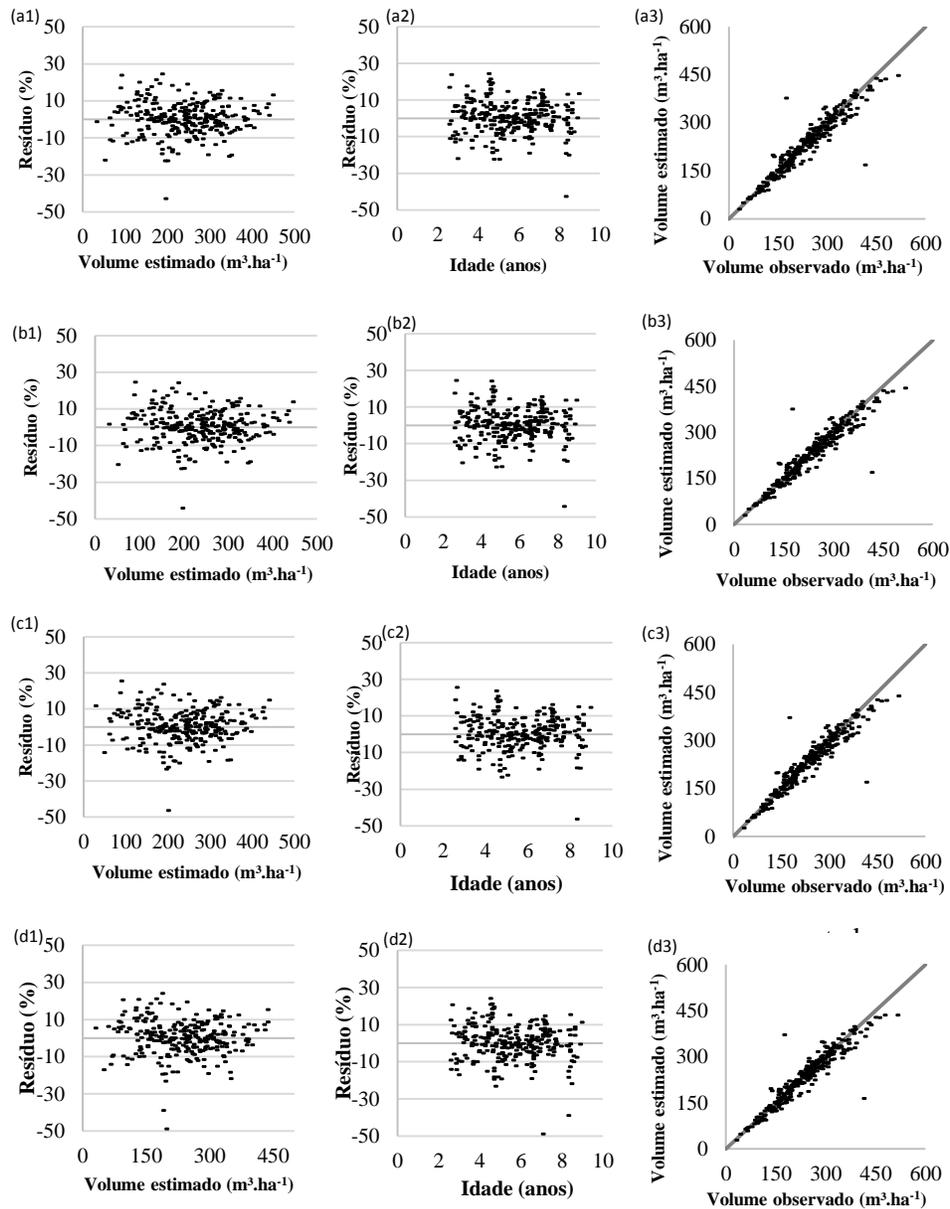
Geralmente, o ajuste da equação de área basal resulta em valores negativos para o parâmetro α_1 . Isto implica em risco nas projeções, pois o que se espera é que o sítio tenha influência positiva e significativa sobre o crescimento em área basal. Valores negativos desse parâmetro, conforme obtido neste trabalho (Tabela 3), geram tendência oposta, fazendo com que as curvas de projeção se cruzem no decorrer do tempo, fato incoerente com o comportamento biológico esperado, o que compromete as estimativas do modelo volumétrico. Logo, apesar de apresentar resultados estatísticos satisfatórios o modelo de área basal, ao resultar em valor negativo do parâmetro em questão, não terá consistência biológica e, portanto, não será seguro aplicá-lo.

Diante da percepção dessa irregularidade no modelo, alguns pesquisadores optam por substituir o fator sítio por outras variáveis como $\ln(B_1)$. Esta alteração foi adotada por Miranda et al. (2014) e Roveda et al. (2016). No entanto, a presença da variável sítio na projeção da área basal, é fundamental para que ocorra consistência na definição da idade ótima de corte, uma vez que sítios mais produtivos tendem a atingi-la antes dos sítios menos produtivos.

Cabe ressaltar, que a técnica de mínimos quadrados ordinários é comumente empregada para estimar, separadamente, os parâmetros de cada equação dentro do sistema. Porém, o ajuste independente das equações pode levar a estimativas tendenciosas e inconsistentes, devido a correlação entre as variáveis explicativas e os erros (BURKHART; TOMÉ, 2012). Em sistemas que possuem equações interdependentes, as variáveis a serem estimadas são definidas como variáveis endógenas, e estas estão também inseridas dentro do sistema como variáveis preditoras. As demais são definidas como variáveis exógenas. Portanto, alternativas viáveis ao ajuste de sistemas de equações são os métodos de ajuste em dois ou três estágios (BURKHART; TOMÉ, 2012) por isso a necessidade em sempre verificar o método mais adequado a ser adotado.

Por meio do teste dos modelos, foi verificado que todos apresentaram resultados satisfatórios, com erros padrão iguais a 11,95%; 11,97%; 12,04% e 12,02% para o modelo completo, selecionado, usual e modificado, respectivamente. Neste caso, o modelo selecionado obteve o melhor resultado, visto que o modelo completo não apresentou consistência, e o modelo usual o maior erro padrão. A distribuição dos resíduos foi homogênea e não tendenciosa e a correlação entre as produções observadas e estimadas (Figura 6) apresentou tendência a subestimar as produções acima de $400 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ em todos os modelos.

Figura 6 - Gráficos de dispersão dos resíduos e correlação entre as produtividades observadas e estimadas para os testes dos quatro modelos ajustados na base de dados do povoamento de eucalipto não desbastado. Modelo completo (a); modelo seleccionado (b); modelo usual (c) e modelo modificado (d).



sistemas do modelo de Clutter ajustados para o povoamento submetido a desbaste. Nessa abordagem, os valores de erro padrão variaram entre 0,0516 e 0,2297 ($\ln(m^3 \cdot ha^{-1})$) e os coeficientes de determinação entre 54,34% e 97,68%. O sistema selecionado não foi o de maior R^2 e menor erro padrão, pois o mesmo apresentou os valores dos coeficientes com sinais diferentes do esperado. Portanto, foi escolhido o terceiro melhor sistema, o qual continha o modelo volumétrico com erro padrão igual a 0,0532 ($\ln(m^3 \cdot ha^{-1})$) e R^2 igual a 97,55% em que todos os sinais dos parâmetros foram adequados.

Cabe ressaltar, que a adoção de modelos com parâmetros que não se comportem de forma condizente com a relação biológica observada entre as variáveis, pode gerar estimativas inconsistentes da produção futura. Uma das causas desse problema é a multicolinearidade, fenômeno ocorrido quando algumas variáveis explanatórias, em modelos lineares, são altamente correlacionadas, gerando parâmetros com pouca precisão (BETTINGER *et al.*, 2009).

O modelo modificado resultou no menor erro padrão percentual (9,82%) dentre os quatro sistemas analisados, seguido pelo modelo completo (9,87%), selecionado (9,89%) e o usual (9,92%). Em geral, todos os sistemas apresentaram consistência e todos os parâmetros foram significativos pelo teste t ($p < 0,05$), exceto a interação SI_2^{-1} no modelo completo e a interação $\frac{1}{I_2} \frac{1}{\ln(G_2)}$ no modelo modificado.

Tabela 5 - Estimativas dos parâmetros dos modelos de volume associados aos valores de probabilidade de significância (p-valor) e a estatística erro padrão percentual dos modelos volumétricos para o povoamento de eucalipto desbastado.

Parâmetros	Completo	Selecionado	Usual	Modificado		
β_0	-	9,756089 (6,22E-05)	2,876401 (2,22E-16)	2,486624 (2,22E-16)	-	10,9922 (2,00E-16)
β_1	I_2^{-1}	-3,5196 (0,02813)	-2,656437 (2,22E-16)	-2,69102 (2,22E-16)	I_2^{-1}	-3,7202 (4,00E-09)
β_2	S	-0,25728 (0,004739)	-	0,018302 (4,44E-16)	$\frac{1}{\ln(G_2)}$	-13,6279 (3,23E-10)
β_3	$\ln(B_2)$	-1,79501 (0,030076)	0,738286 (2,22E-16)	0,928835 (2,22E-16)	$\frac{1}{S}$	-72,1007 (0,000481)
β_4	$I_2^{-1}\ln(B_2)$	0,693976 (0,007839)	-	-	$\frac{1}{I_2} \frac{1}{\ln(G_2)}$	2,6105 (0,104593)
β_5	$S\ln(B_2)$	0,103116 (0,000965)	0,008454 (2,22E-16)	-	$\frac{1}{S} \frac{1}{\ln(G_2)}$	163,0184 (0,003428)
β_6	SI_2^{-1}	-0,0371 (0,47288)	-	-	-	-
Sy.x%		9,87	9,89	9,92	-	9,82

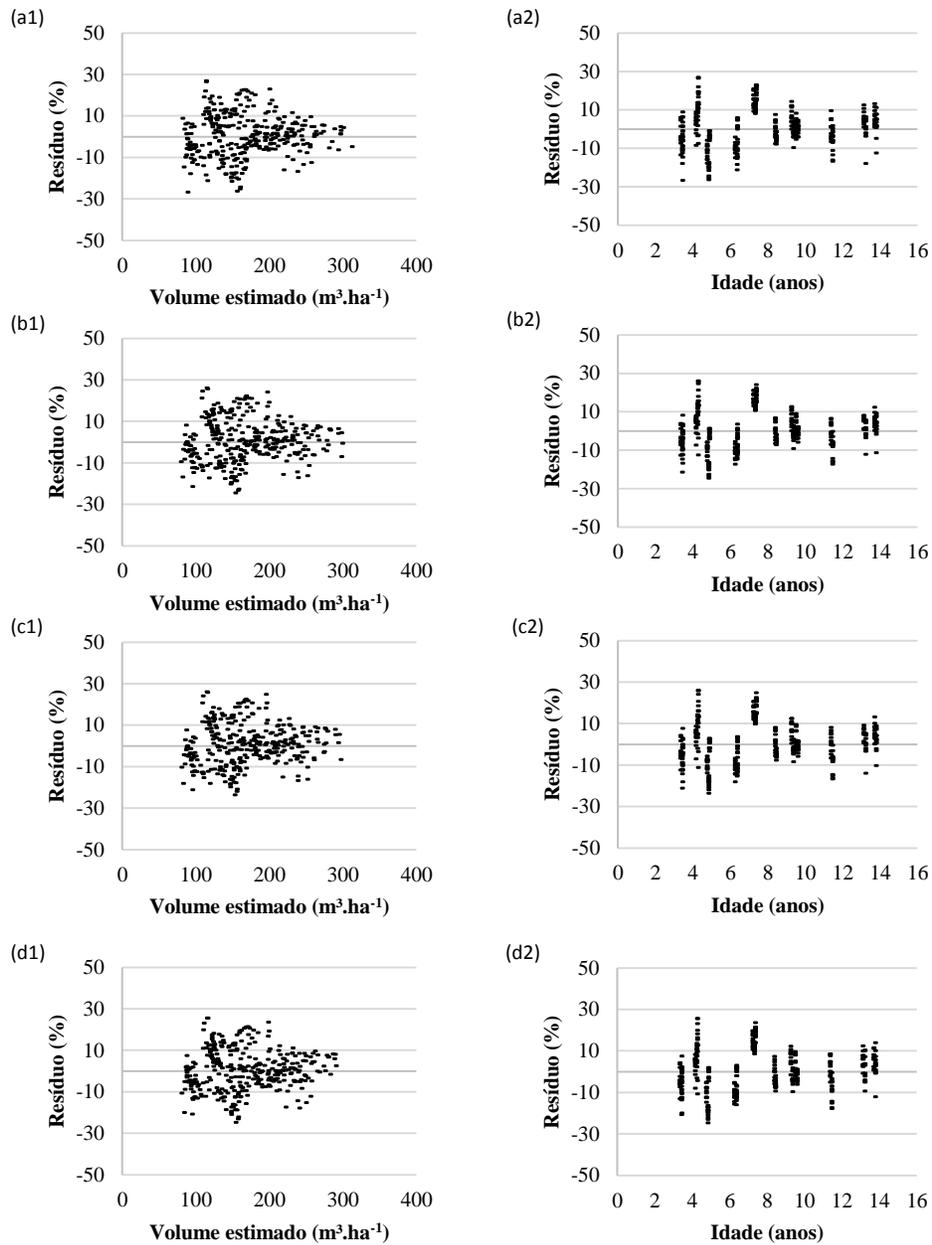
O modelo modificado apresentou o parâmetro da interação $\frac{1}{I_2} \frac{1}{\ln(G_2)}$ (β_4) não significativo, porém a interação entre $\frac{1}{S} \frac{1}{\ln(G_2)}$ foi significativa. Esta interação representa a influência das variáveis sítio e área basal na inclinação da reta que é a base do modelo, isto é, entre $\ln(V_2)$ e $\frac{1}{I_2}$. Caso não houvesse significância dos parâmetros β_4 e β_5 , indicaria que para diferentes valores de idade, sítio e área basal as retas seriam paralelas, ou seja, teriam a mesma inclinação variando apenas o valor de β_0 . Além disso, o sinal do parâmetro na interação $\frac{1}{S} \frac{1}{\ln(G_2)}$ foi positivo, determinando que a inclinação está no sentido ascendente, ou seja, a reta aponta para cima.

Por este motivo é sempre importante verificar a interação entre as variáveis, que podem promover ajustes mais consistentes para a base de dados utilizada, o que não ocorre no modelo usual de Clutter, pois não compreende as

interações entre as variáveis, por isso, o uso deste modelo nem sempre pode ser o mais adequado.

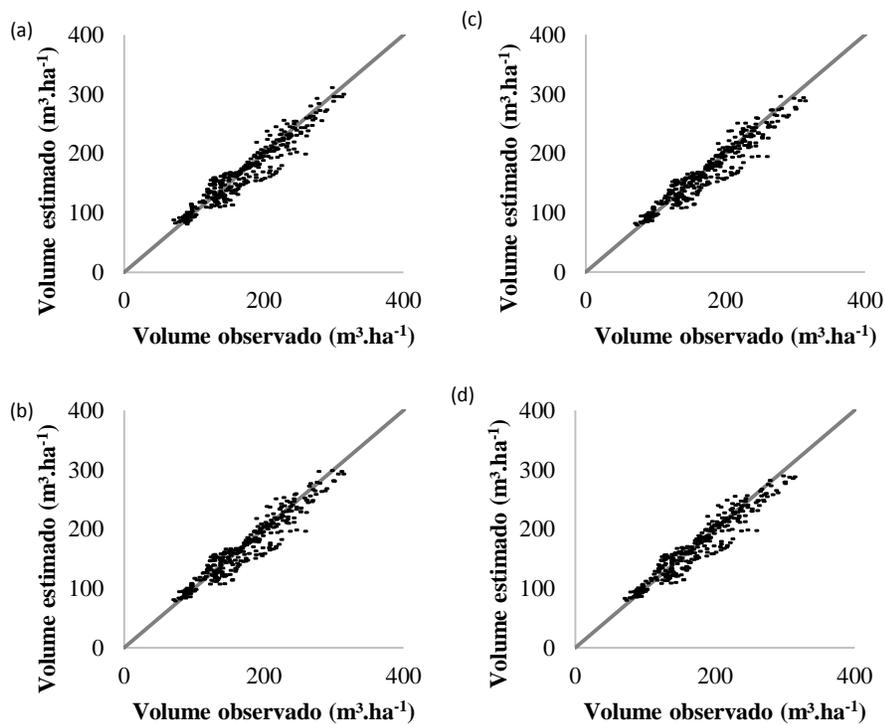
A dispersão dos erros relativos percentuais apresentou variação nas menores estimativas de volume, assim como no povoamento não desbastado, e, em algumas idades, a tendência de super e subestimativa, porém com a maior parte concentrada entre $\pm 10\%$ de erro (Figura 7).

Figura 7 - Dispersão dos erros relativos percentuais em função do volume estimado e da idade para os modelos ajustados na base de dados do povoamento de eucalipto desbastado. Modelo completo (a); modelo selecionado (b); modelo usual (c) e modelo modificado (d).



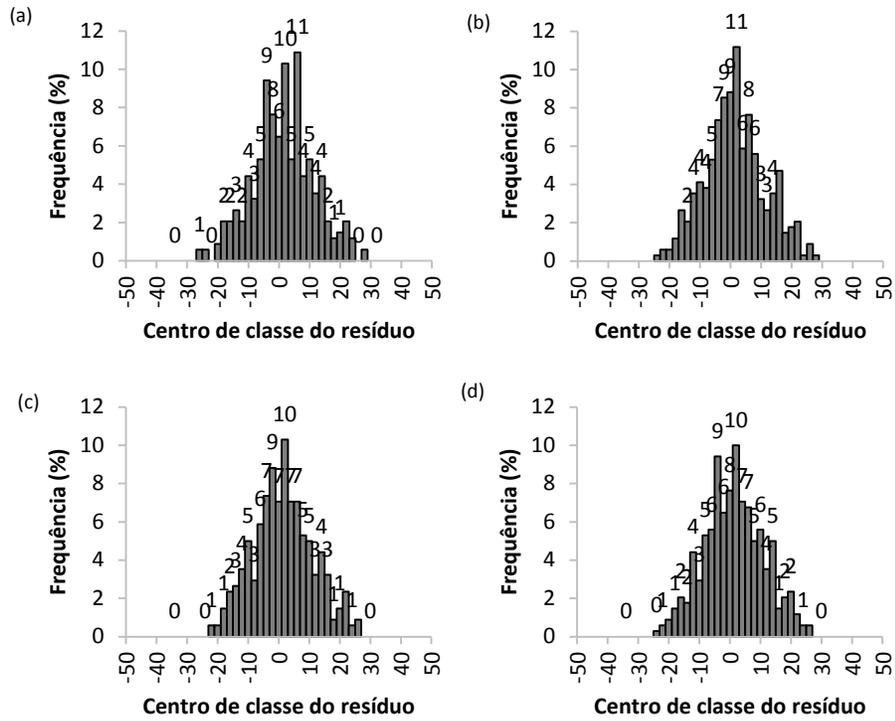
As correlações entre as produções observadas e estimadas obtiveram distribuição homogênea dos dados e próximos da reta de 45°, com uma leve tendência de subestimativa em valores perto de 300 m³.ha⁻¹ no modelo modificado. Porém, assim como no povoamento não desbastado, esse comportamento ocorre em valores de produção posteriores a idade técnica de corte, não comprometendo o desempenho do modelo.

Figura 8 - Correlação entre as produções observadas e estimadas para os modelos ajustados na base de dados do povoamento de eucalipto desbastado. Modelo completo (a); modelo selecionado (b); modelo usual (c) e modelo modificado (d).



Na Figura 9 percebe-se que os histogramas de frequência dos resíduos se apresentam com tendência próxima da normal no modelo selecionado, nos demais, houve a presença de dois picos em relação a classe central. As distribuições dos modelos completos, selecionado, usual e modificado, obtiveram 73%, 72%, 72% e 72% dos resíduos presentes entre $\pm 10\%$, respectivamente. Resultado muito próximo do apresentado pela base de dados do povoamento sem desbaste, o que mostra a eficiência e flexibilidade do modelo de Clutter ao ser empregado também em povoamentos submetidos a desbaste. Essa análise corrobora com estudo desenvolvido por Dias et al. (2005), onde os autores verificaram um bom desempenho estatístico e biológico do modelo de Clutter para estimar a produtividade em povoamentos de eucalipto desbastado. É relevante destacar a importância da técnica do desbaste para ganhos em qualidade da madeira sem que haja interferência na produção líquida final (GORGENS et al., 2007).

Figura 9 - Histograma de frequência dos erros relativos percentuais dos modelos volumétricos ajustados na base de dados do povoamento de eucalipto desbastado. Modelo completo (a); modelo selecionado (b); modelo usual (c), modelo modificado (d).



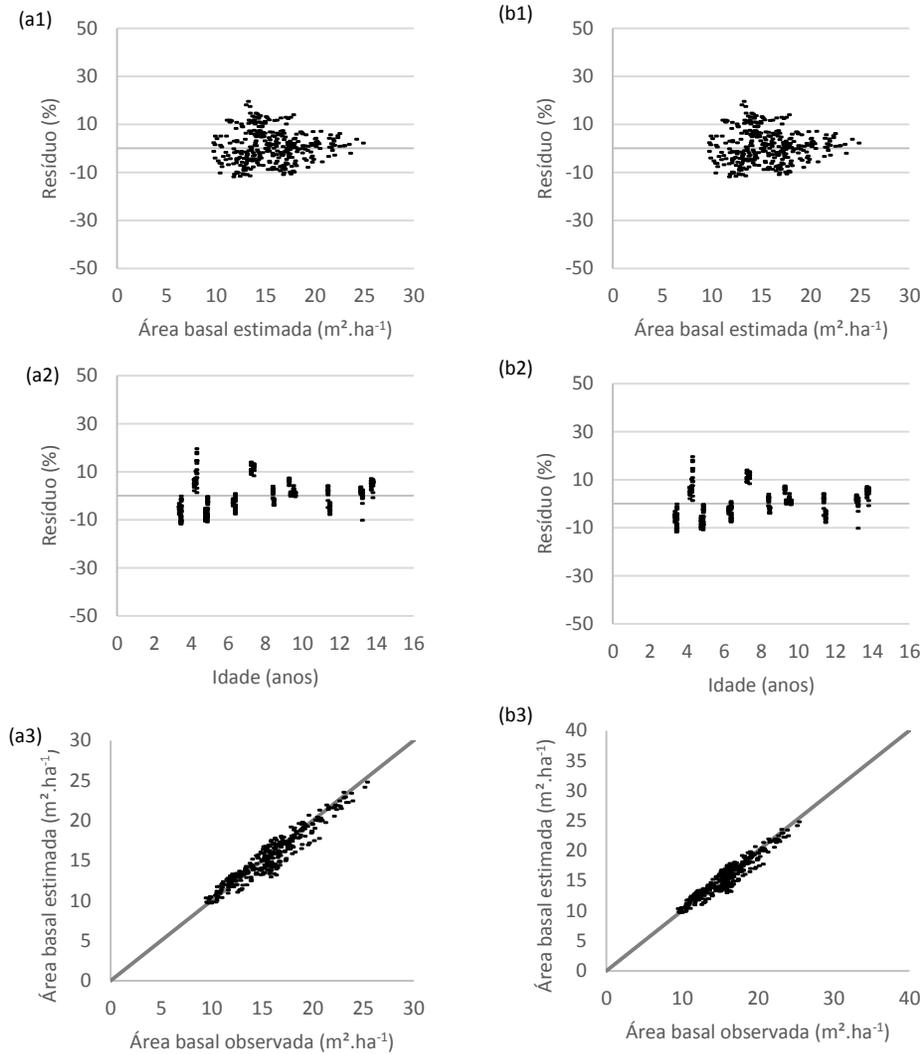
Nessa abordagem, os modelos de área basal para os sistemas completo, selecionado, usual e modificado apresentaram um $Sy.x = 6,49\%$, valor considerado satisfatório em termos de exatidão (Tabela 6), porém os parâmetros α_1 apresentaram inconsistência biológica, resultando em valores negativos no ajuste. Os gráficos de dispersão (Figura 10) apresentaram a mesma tendência que na base sem desbaste, com superestimativa em áreas basais menores e subestimativa em áreas basais maiores.

Tabela 6 - Estimativas dos parâmetros do modelo de área basal para os quatro sistemas, associados aos valores de probabilidade de significância (p-valor) e a estatística erro padrão percentual ($Sy.x\%$) para o povoamento de eucalipto desbastado.

Modelo	Sy.x%	$1 - \left(\frac{I_1}{I_2}\right)$	$1 - \left(\frac{I_1}{I_2}\right) * S$
		α_0	α_1
Completo Selecionado Usual	6,49	4,2874673 (2,0E-16)	-0,0342495 (0,032587)
Modificado	6,49	4,28747 (2,0E-16)	-0,03425 (0,0326)

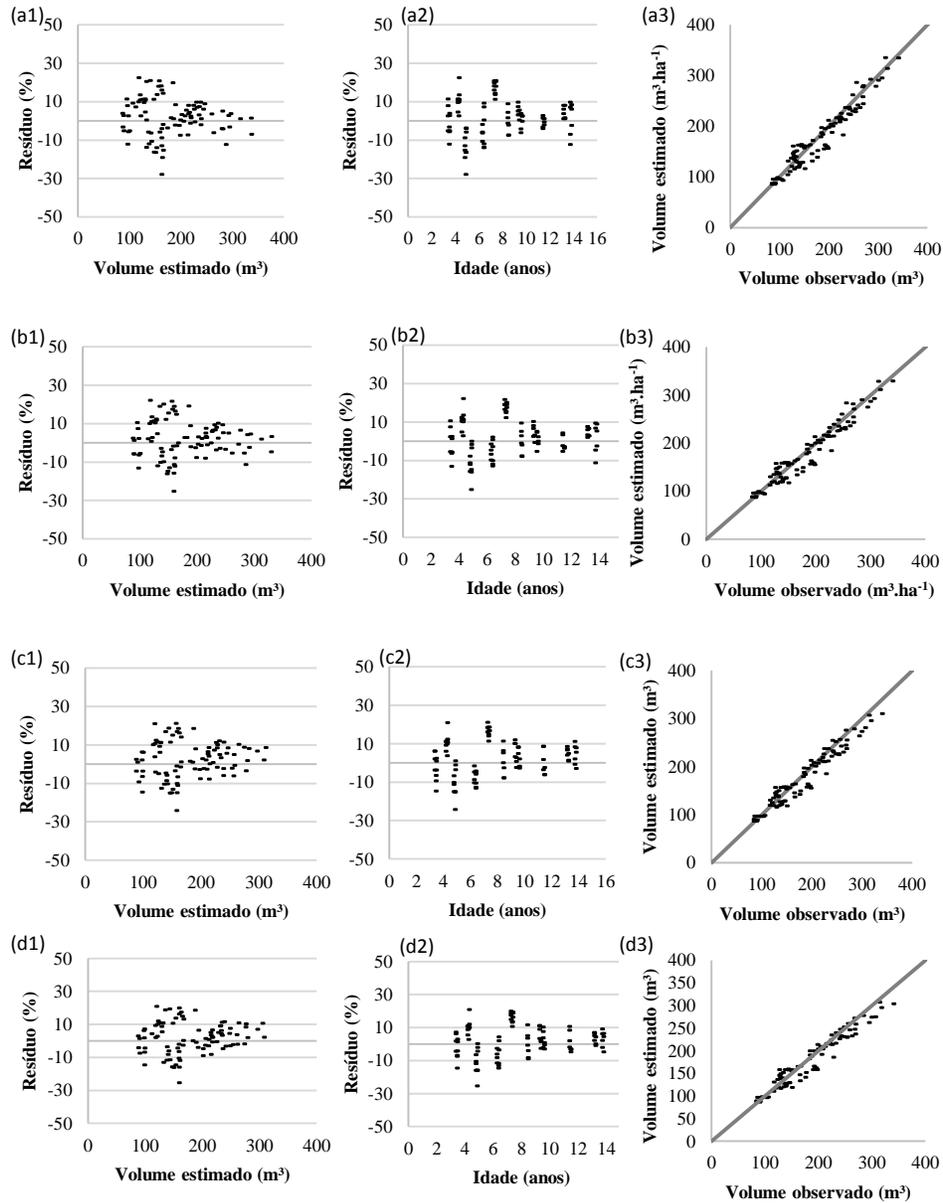
Em alguns trabalhos, relacionados ao estudo do crescimento em povoamentos florestais desbastados, também foi verificado a busca por alternativas para evitar o problema de inconsistência no ajuste do modelo de área basal, como Gorgens et al. (2007) e Dias et al. (2005), que optaram por retirar a variável sítio do modelo e reajustá-lo.

Figura 10 - Gráficos de dispersão dos resíduos em função da área basal estimada (1) e da idade (2) e gráfico de correlação entre as áreas basais estimadas e observadas (3) para os modelos completo, selecionado e usual (a) e para o modelo modificado (b) ajustados para a bse de dados com desbaste.



A validação dos modelos resultou em erros padrão iguais a 9,47%; 9,28%; 9,65% e 9,63% para o modelo completo, selecionado, usual e modificado, respectivamente. Os gráficos de dispersão apresentaram tendência de subestimativa em produções menores e superestimativas em produções maiores (Figura 11). Comportamento muito evidente no modelo completo, mais suave no modelo selecionado e melhor balanceado no modelo usual, já o modelo modificado obteve maior tendência a subestimar o volume.

Figura 11 - Gráficos de dispersão dos resíduos e correlação entre as produtividades observadas e estimadas para o teste dos três modelos ajustados na base de dados do povoamento de eucalipto desbastado. Modelo completo (a); modelo selecionado (b); modelo usual (c) e modelo modificado (d).



É bastante comum o emprego do modelo de Clutter (1963), principalmente na sua forma usual, como base de comparação com outras opções de modelos ou como ferramenta para estimar a produtividade de plantios florestais, em estudos ligados ao manejo florestal, como exemplo: Roveda et al., (2016), Castro et al. (2015), Nascimento et al. (2015), Miranda et al. (2014), Castro et al. (2013), Salles et al. (2012), Oliveira et al., (2009), Demolinari et al., (2007), Santana et al. (2005), Soares et al. (2004), Soares e Leite (2000), Soares et al. (1998), dentre outros. Portanto, melhorias no modelo, principalmente da área basal, podem trazer ganhos em flexibilidade, eficiência e precisão das estimativas, aumentando a confiabilidade das informações utilizadas nas tomadas de decisão.

Apesar da grande maioria adotar o sistema usual, é sempre importante verificar o desempenho do modelo em suas muitas possibilidades de ajuste, pois o modelo em sua forma original é mais flexível, e as interações podem ser significativas em alguns casos (CAMPOS; LEITE, 2013; SALLES et al., 2012; ALCÂNTARA, 2012; CLUTTER 1963).

4 CONCLUSÕES

Ao utilizar o modelo selecionado, houve ganho em precisão das estimativas para as duas bases de dados, assim como o modelo modificado, comprovando a importância em sempre verificar a forma do modelo de Clutter que seja mais adequada e que apresente consistência biológica.

O modelo modificado apresentou consistência e precisão nas estimativas, podendo ser aplicado em povoamentos com ou sem desbaste.

Nas duas bases de dados o modelo usual apresentou maior erro padrão, tanto no ajuste quanto no teste, comprovando que a presença das interações no modelo pode melhorar a precisão das estimativas.

Na base de dados sem desbaste, a relação funcional contendo o modelo volumétrico modificado e selecionado foram os mais eficientes. O mesmo foi concluído para a base com desbaste.

O modelo de Clutter apresenta flexibilidade e consistência biológica para gerar estimativas de produção em volume e área basal em povoamentos submetidos a desbaste.

Possivelmente, alterações no modelo da área basal podem gerar melhorias nas estimativas geradas pelo sistema de equações de Clutter.

REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA, A. Alternativas de modelagem para projeção do crescimento de eucalipto em nível de povoamento. 2012. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

BETTINGER, P.; BOSTON, K.; SIRY, J. P.; GREBNER, D. L. **Forest Management and Planning**. [s.l: s.n.], 2009.

BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. **Modeling Forest Trees and Stands**. [s.l: s.n.]. v. 1, 2012.

CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. Mensuração florestal: **perguntas e respostas**. Viçosa: UFV, 2013. 650 p.

CASTRO, R. V. O.; CUNHA, A. B.; SILVA, L. V.; LEITE, H. G.; SILVA, A. A. L. Modelagem do crescimento e produção para um povoamento de Eucalyptus utilizando dois métodos para quantificação do índice de local. *Scientia Forestalis*. p. 83–90, 2015.

CASTRO, R. V. O.; SOARES, C.P.B.; MARTINS, F.B.; LEITE, H. G. **Crescimento e produção de plantios comerciais de eucalipto estimados por duas categorias de modelos**. *Pesq. agropec. Bras.*, Brasília, v. 48, n.3, p.287-295, mar. 2013.

CLUTTER, J.L, Compatible growth and yield models for loblolly pine, **Forest Science**,v. 9, n. 3, p. 355-371, 1963.

CLUTTER, J. L.; FORTSON, J. C.; PIENAAR, L. V.; BRISTER, G. H.; BAILEY, R. L. **Timber management: a quantitative approach**. New York: John Wiley & Sons, 1983.

DEMOLINARI, R. D. A.; SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L. DE. Crescimento de plantios clonais de eucalipto não desbastados na região de Monte Dourado (PA). **Revista Árvore**, v. 31, n. 3, p. 503–512, 2007.

DIAS, A. N.; LEITE, H. G.; CAMPOS, J. C. C.; COUTO, L.; CARVALHO, A. F. Emprego de um modelo de crescimento e produção em povoamentos desbastados de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 29, n. 5, p. 731–739, 2005.

GORGENS, E. B.; LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; DIAS, A. N. Tendência de crescimento de povoamento de eucalipto após aplicação de desbaste. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 879-885, 2007.

MIRANDA, R. O. V.; DIAS, A. N.; FILHO, A. F.; SOARES, I. D.; CRUZ, J. P. Modelagem do crescimento e produção em classes de precipitação pluviométrica para *Eucalyptus* sp. *Floresta*, v. 45, n. 1, p. 117, 2014.

NASCIMENTO, F. A. F. DO; DIAS, A. N.; FIGUEIREDO FILHO, A.; MIRANDA, G. D. M.; ARCE, J. E. Sistema de crescimento e produção para povoamentos de *Pinus taeda* na região norte de Santa Catarina. *Cerne*, v. 21, n. 2, p. 235–242, 2015.

NOGUEIRA, G. S. Modelagem do crescimento e da produção de povoamentos de *Eucalyptus* sp. e *Tectona grandis* submetidos a desbaste. 2003. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

NOGUEIRA, G. S.; MARSHALL, P. L. ; LEITE, H. G.; CAMPOS, J. C. C. Thinning Intensity and Pruning Impacts on Plantations in Brazil. *International Journal of Forestry Research*. v. 2015, p. 1-10, 2015.

OLIVEIRA, M. L. R. DE; LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; CAMPOS, J. C. C. Modeling and Prognosis in Nonthinned Stands of Eucalyptus Clones. *Revista Árvore*, v. 33, n. 5, p. 841–852, 2009.

R CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2016. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Acesso em: 10 jan. 2017.

ROVEDA, M.; DIAS, A. N.; FILHO, A. F. Testes de identidade de modelos aplicados na construção de curvas de índices de local e na produção de povoamentos de *Eucalyptus grandis*. *Scientia Forestalis*, p. 115–127, 2016.

SALLES, T. T.; LEITE, H. G.; OLIVEIRA NETO, S. N.; SOARES, C. P. B.; PAIVA, H. N.; SANTOS, F. L. **Modelo de Clutter na modelagem de crescimento e produção de eucalipto em sistemas de integração lavoura - pecuária – floresta**, n. 1, p. 253–260, 2012.

SANTANA, C.; MELLO, A. A.; EISFELD, R. L.; SANQUETTA, C. R. sistema de equações para simulação do crescimento e da produção em povoamentos de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden sem desbaste baseado no modelo de clutter. *Ambiência*, Guarapuava, v. 1, n. 2, p. 239-256, 2005.

SANTOS, F. L. dos. **Regulação da produção de floresta de eucalipto submetida a desbaste e destinada a multiprodutos**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.

SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G. Predição da produção de madeira de eucalipto em região com alta variabilidade pluviométrica. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, n. 58, p. 41–48, 2000.

SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; OLIVEIRA, M. L. R. DE; CARVALHO, A. Especificação de um modelo de crescimento e produção florestal. **Revista Árvore**, v. 28, n. 6, p. 831–837, 2004.

SOARES, C.P.B.; LEITE, H.G.; CAMPOS, J.C.C.; SEDIYAMA, G.C. A inclusão da precipitação anual em um modelo de crescimento e produção. **Revista árvore**, v. 22, n. 4, p. 475-482, 1998.