



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**USO DE ÍNDICES MORFOMÉTRICOS NA CLASSIFICAÇÃO
DAS UNIDADES PRODUTIVAS EM POVOAMENTOS DE
Eucalyptus urophylla NO ESTADO DE GOIÁS**

JOÃO VICTOR NOBRE CARRIJO

BRASÍLIA

2016



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**USO DE ÍNDICES MORFOMÉTRICOS NA CLASSIFICAÇÃO
DAS UNIDADES PRODUTIVAS EM POVOAMENTOS DE
Eucalyptus urophylla NO ESTADO DE GOIÁS**

JOÃO VICTOR NOBRE CARRIJO

Orientador: Dr. Éder Pereira Miguel

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília como parte das exigências para obtenção do título de Engenheiro Florestal.

BRASÍLIA

2016



Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Florestal

USO DE ÍNDICES MORFOMÉTRICOS NA CLASSIFICAÇÃO
DAS UNIDADES PRODUTIVAS EM POVOAMENTOS DE
Eucalyptus urophylla NO ESTADO DE GOIÁS

Estudante: João Victor Nobre Carrijo

Matrícula: 10/0014038

Orientador: Prof. Dr. Eder Pereira Miguel

Menção: SS

Prof. Dr. Eder Pereira Miguel
Universidade de Brasília – UnB
Departamento de Engenharia Florestal
Orientador

Prof. Dr. Ildeu Soares Martins
Universidade de Brasília – UnB
Departamento de Engenharia Florestal
Membro da Banca

Prof. Dr. Ricardo de Oliveira Gaspar
Universidade de Brasília – UnB
Departamento de Engenharia Florestal
Membro da Banca

Junho 2016

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, por investirem seus sonhos para que eu pudesse realizar os meus; e às minhas irmãs, que se inspirem nessa conquista para alçar voos maiores.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por me dar a oportunidade e a capacidade de alcançar esta conquista.

Aos meus pais, Carla e Jurandir, pelo amor, educação, suporte e por serem a base fundamental da minha vida.

Às minhas irmãs, Camilla e Maria Clara, pelo apoio e carinho em todos os momentos.

Aos amigos da engenharia florestal que fizeram parte desse jornada, dividindo alegrias, tristezas, estudos, festas e mesas de bar. Em especial aqueles que mais impactaram esse período: Ivo, Maite, Mariana, Camilla, Pedro, Leonardo, Anian, Brummel, Isabela, Marina, pois sem eles todo esse caminho não seria o mesmo.

À ECOFLOR, empresa que mudou meu jeito de encarar o mundo e me ensinou a sair da zona de conforto, e seus membros, em especial a Direx 2013 Camilla, Marcela, Mirella, Isabele e Daniel.

Ao professor Éder Miguel, pela orientação exemplar e todo o conhecimento transmitido, me inspirando a escolher minha área de atuação.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	3
2. OBJETIVO.....	5
2.1 Objetivo Geral	5
2.2 Objetivos Específicos	5
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	5
3.1 Sítios Florestais.....	5
3.1.1 Classificação e Índice de Sítio	6
3.2 Variáveis e Índice do Povoamento.	7
3.2.1 Altura Dominante	7
3.2.2 Altura de Lorey	8
3.2.3 Diâmetro Dominante	9
3.2.4 Diâmetro Médio Quadrático.....	9
3.3 Índices Morfométricos.....	10
4. MATERIAIS E MÉTODOS	11
4.1 Caracterização da Área de Estudo	11
4.2 Amostragem.....	12
4.3 Obtenção de Variáveis e Índices Morfométricos	13
4.3.1 Altura Dominante	13
4.3.2 Altura de Lorey	14
4.3.3 Diâmetro Dominante	14
4.3.4 Diâmetro Médio Quadrático.....	14
4.3.5 Média dos Diâmetros	14
4.3.6 Índices Morfométricos	14
4.4 Volumetria	15
4.5 Área Basal.....	16
4.6 Correlação Entre Variáveis.....	16
4.7 Classificação de Sítio.....	17
4.8 Prognose	18
4.9 Avaliação das Variáveis	18
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
5.1 Volumetria	19
5.2 Correlação Entre Variáveis.....	20
5.3 Classificação de Sítio.....	21
5.4 Prognose	31

5.5	Avaliação das Variáveis	34
6.	CONCLUSÃO	36
7.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	37

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da área de estudo, município de Niquelândia (MIGUEL, 2009).....	12
Figura 2. Modelo das características dimensionais de uma árvore.	15
Figura 3. Distribuição dos resíduos percentuais em função do diâmetro à altura do peito para as três funções volumétricas testadas.	19
Figura 4. Distribuição dos resíduos percentuais em função da altura dominante para as quatro melhores funções testadas.	22
Figura 5. Distribuição dos resíduos percentuais em função da média dos diâmetros para as quatro melhores funções testadas.	22
Figura 6. Distribuição dos resíduos percentuais em função do diâmetro médio quadrático para as quatro melhores funções testadas.....	23
Figura 7. Distribuição dos resíduos percentuais em função do grau de esbeltez para as quatro melhores funções testadas.	23
Figura 8. Distribuição dos resíduos percentuais em função do índice de saliência para as quatro melhores funções testadas.	24
Figura 9. Distribuição dos resíduos percentuais em função do formal de copa para as quatro melhores funções testadas.	24
Figura 10. Curvas limite das classes de sítio para o povoamento em função das variáveis estudadas. LS – III = limite superior da classe III; LS-II = limite superior da classe II; LS-I = limite superior da classe I.	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Modelos utilizados na estimativa de diâmetro de copa.	13
Tabela 2. Modelos volumétricos ajustados	16
Tabela 3. Modelo ajustados para expressar a capacidade produtiva dos sítios florestais.	17
Tabela 4. Coeficientes dos modelos ajustados com suas estatísticas de ajuste e precisão para estimativa do volume.	19
Tabela 5. Resultados da correlação anual entre as variáveis estudadas e volume.	20
Tabela 6. Coeficientes dos quatro melhores modelos ajustados com suas estatísticas de ajuste e precisão para estimativa de altura dominante.....	26
Tabela 7. Coeficientes dos quatro melhores modelos ajustados com suas estatísticas de ajuste e precisão para estimativa de média dos diâmetros.....	26
Tabela 8. Coeficientes dos quatro melhores modelos ajustados com suas estatísticas de ajuste e precisão para estimativa de diâmetro médio quadrático.....	27
Tabela 9. Coeficientes dos quatro melhores modelos ajustados com suas estatísticas de ajuste e precisão para estimativa de grau de esbeltez.....	27
Tabela 10. Coeficientes dos quatro melhores modelos ajustados com suas estatísticas de ajuste e precisão para estimativa de índice de saliência.	28
Tabela 11. Coeficientes dos quatro melhores modelos ajustados com suas estatísticas de ajuste e precisão para estimativa de formal de copa.....	28
Tabela 12. Classificação de sítio adotados para as parcelas amostradas em função das variáveis estudadas.	29
Tabela 13. Índices de sítio adotados para o povoamento em função das variáveis estudadas.....	29
Tabela 14. Coeficientes do modelo de Clutter ajustado com suas estatísticas de precisão para a prognose do volume em função das variáveis estudadas.	32

Tabela 15. Valores de projeção volumétrica para as parcelas de validação do sítio 1 nos anos amostrais em função das variáveis estudadas.	33
Tabela 16. Valores encontrados para diferença agregada e erro médio absoluto na projeção volumétrica utilizando as variáveis estudadas.	35
Tabela 17. ANOVA em ajuste fatorial.	36

RESUMO

Este trabalho objetivou validar o uso da Altura Dominante na classificação das unidades produtivas e avaliar a adequação de índices morfométricos e variáveis dendrométricas para a mesma função aplicados em plantio comercial de *Eucalyptus urophylla*, localizado no município de Niquelândia-GO. O inventário contínuo foi realizada entre os anos de 2011 e 2014 em 21 parcelas permanentes de área fixa útil de 496m² quando o povoamento apresentando idade entre 3 e 6 anos, e levantou valores de DAP (diâmetro à altura do peito), Ht (altura total), Hc (altura comercial/copa) e DC (diâmetro de copa), além de realizar cubagem rigorosa segundo a metodologia de Smalian. Posteriormente foram ajustados modelos volumétricos para estimar o volume médio corrente por hectare para cada parcela nos anos amostrados, sendo o modelo proposto por Shcumacher-Hall o que apresentou melhores resultados de precisão. Foram testadas nove distintas variáveis para a avaliação da classificação de sítio: Hdom (altura dominante), HL (altura de Lorey), Ddom (diâmetro dominante), Dm (média dos diâmetros), Dg (diâmetro quadrático) e os índices morfométricos GE (grau de esbeltez), IA (índice de abrangência), ISa (índice de saliência) e FC (formal de copa). Uma matriz de correlação entre as variáveis propostas e o volume por unidade de área foi construída e apresentou correlação não significativa para as variáveis HL, Ddom e IA, que foram prontamente descartadas. Hdom também apresentou correlação não significativa, mas continuou no trabalho a teor de comparação com as variáveis restantes. Cinco modelos sigmoidais foram ajustados para cada variável, afim de classifica as unidades produtivas, sendo que os modelos de Richards e Weibull foram os escolhidos para a maioria das variáveis. A classificação de sítio foi feita pelo método da curva guia. Sequencialmente o modelo de projeção de Clutter foi ajustado, para as diferentes variáveis utilizadas na classificação dos sítios. Os resultados do modelo de projeção via diferentes variáveis predictoras de sítios foram utilizados para elaboração da análise de eficácia das mesmas, via diferença agregada (Da%) e erro médio absoluto (Ei), e realização da análise de variância (ANOVA) entre o volume observado (testemunha) e predito(tratamentos). Todas as variáveis utilizadas na classificação de sítios apresentaram ajuste aceitável para Clutter, baixa subestimação de volume em Da% e Ei, com destaque para FC e Dm, que apresentaram os melhores valores em todas estas análises. A ANOVA indicou a inexistência de diferença significativa entre as variáveis testadas, para classificar as unidades produtivas, indicando que estas são adequadas para a classificação de sítio e podem substituir a altura dominante, em especial o formal de copa e o média dos diâmetros.

Palavras-chave: manejo florestal, produção, crescimento, modelagem.

ABSTRACT

This study aimed to ratify using Assmann dominant height (Hd) for sites classification and to assess using morphometric indexes and variables rather Hd for the same purpose. The study takes place in a stand of *Eucalyptus urophylla* located in the county of Niquelândia, state of Goiás, Brazil. A continuous sampling was carried out from 2011 to 2014 on 21 randomly set plots with 496 m² area, when collected DBH, or DAP, (diameter taken at 1.30 m above ground), Ht (total height), Hc (commercial height/crown height), and DC (crown diameter), furthermore the volume was estimated using data from 200 cubed trees when Schumacher-Hall's volumetric model was the most suitable. Site classification was made using nine different variables: dominant height (Hdom), Lorey height (HL), dominant diameter (Ddom), mean diameter (Dm), mean square diameter (Dg), slenderness degree (GE), coverage index (IA), projection index (ISa) and crown form (FC). A correlation matrix was made between all this variables and volume. HL, Ddom and IA didn't show significant correlation with volume and they was dismissed. Hdom also showed bad correlation, but it was used through the study for a better comparison with other variables. Five sigmoidal models was adjusted by regression for each variable. Richard's and Weibull's model was chose the best ones for most of variables. Site classification was performed using guide curve method. Using final site classification and indexes for adjusting Clutter projection model, and then its results for efficiency and variance analysis (ANOVA) returned low underestimation for all variables according to aggregate difference (Da%) and mean absolute error (Ei). ANOVA test returned no significant difference between predicted volumes using morphometric variables and observed volume, highlights for FC and Dm in all tests results, which means all these variables are appropriate for site classification use, possibly replacing Hdom.

Key words: forest management, production, growth, modelling.

1. INTRODUÇÃO

A área de florestas plantadas no mundo é de 264 milhões de hectares e representa 7% de todas as florestas globais, sendo a maior parte (61%) localizada na China, Índia e Estados Unidos. O Brasil detém 7,6 milhões de hectares plantados (3%), todavia contribui anualmente com 17% de toda a madeira colhida, em decorrência da alta produtividade dos plantios, principalmente árvores do gênero *Eucalyptus*, o qual representam 72% da área florestal plantadas no país (IBÁ, 2014).

O setor produtivo florestal tem mostrado grande força no cenário nacional. Estima-se que o setor apresentou um saldo anual de aproximadamente US\$ 6,5 bilhões em 2015, crescimento na casa de 17% em relação ao ano anterior, contando com US\$ 7,8 bilhões em exportações no mesmo ano. Desta forma o setor de produção florestal, considerando a indústria de celulose e papel e painéis de madeira, contribuiu com 4,09% das exportações totais do país em 2015 (IBÁ, 2016).

Estima-se que de todas as árvores plantadas no mundo, o gênero *Eucalyptus* é responsável por 38% (PÉREZ-CRUZADO *et al.*, 2011), sendo a Índia o país com maior área plantada, com 22% deste gênero. O Brasil é o segundo colocado (21%) e o estabelecimento de novos plantios no país é crescente em função da demanda de madeira por parte das indústrias, que utilizam dessa matéria prima, bem como o favorecimento na redução da pressão sobre as áreas nativas, o que minimiza os impactos ao meio ambiente.

Além de ser o principal gênero cultivado no Brasil, o *Eucalyptus* é a árvore mais plantada nos trópicos (EPRON *et al.*, 2013), devido ao seu rápido crescimento, produtividade, boa capacidade de adaptação, diversidade de espécies e ampla possibilidade de uso.

Neste contexto, o manejo florestal tem contribuído de forma significativa para alavancar cada vez mais a formação de povoamentos no país. De acordo com Scolforo *et al.* (2013) o manejo florestal, de um ponto de vista mais amplo, envolve assegurar a sustentabilidade de uma empresa do setor por meio de escolhas e decisões estratégicas, buscando sempre otimizar todos os processos, observando as condições de demanda, produtividade, distâncias e custos de colheita e tratamentos silviculturais. Sendo assim, a escolha da melhor prática de manejo para cada sítio florestal contribui de forma significativa para o sucesso de qualquer empreendimento florestal.

Para alcançar tais objetivos, o manejo florestal lança mão de várias técnicas e conceitos, dentre as quais destaca-se a classificação de sítios florestais, avaliando sua qualidade de sítio, que no âmbito do manejo é um dos principais elementos que sustentam qualquer tomada de decisão relacionada a planejamento, previsão e investimentos.

Campos e Leite (2013) determinam a capacidade produtiva do local de plantio, ou a qualidade de sítio, como sendo o potencial de um determinado local para a produção de madeira ou outro produto florestal, para uma determinada espécie ou clone. A influência para essa qualidade vem da somatória dos aspectos climáticos e edáficos do local.

Apesar do foco cada vez maior das empresas florestais em planejamento e otimização de sua produção, visando racionalizar sua exploração, onde a classificação de sítios se mostra um elemento estratégico de suma importância capaz de auxiliar em atividades como estratificação do potencial produtivo da espécie plantada, que leva a uma análise mais clara de possibilidade e riscos para o manejo desses empreendimentos, endossando e fortalecendo a base de planejamento em âmbito local e regional, a curto médio e longo prazo (SCOLFORO; MACHADO, 1988), são poucas as empresas que possuem o mapeamento e classificação das suas áreas produtivas (MIGUEL, 2009), o que nos leva a um quadro ainda mais grave de poucos estudos a respeito do assunto.

Além disso, essa classificação ainda é útil para estratificação de operações como desbaste, corte final e planejamento de venda.

Há diversas maneiras, diretas e indiretas, de se realizar a classificação de sítio, sendo a classificação a partir da altura dominante da população, que é um método de classificação direto e quantitativo, a mais amplamente utilizada por ser considerada mais prática e contar com a vantagem de ter como base uma variável dendrométrica pouco influenciada por tratamentos silviculturais. Para dar ainda mais confiabilidade a este método, tornou-se consenso utilizar o princípio de Assmann (1970), que definiu altura dominante como sendo o valor médio das alturas das 100 árvores de maior diâmetro por hectare. A escolha deste princípio se dá pela relação da altura dominante com o diâmetro que é a variável com a maior influência no volume de madeira de cada indivíduo.

Apesar de amplamente utilizada, a altura dominante pode apresentar erros devido às ocasionais dificuldades de mensuração e ao uso de hipsometria para estimar valores de altura de diversos indivíduos do povoamento. Desta forma, já é possível encontrar na literatura estudos que testam e comparam o uso de variáveis alternativas ao uso de altura dominante, como o trabalho realizado por Leite *et al.* (2011), que utiliza o diâmetro das árvores dominantes como variável independente na classificação de unidades produtivas.

Outras variáveis que possuem potencial para ser usada em diversos modelos e técnicas florestais, mas com baixo investimento em estudos, as relações morfométricas, índices morfométricos, ou simplesmente morfometria dos indivíduos florestais, possibilitam ter ideia das relações interdimensionais do indivíduo, reconstruindo o espaço ocupado por cada árvore,

analisar o nível de competição em um povoamento, além de fornecer dados para inferir sobre estabilidade, vitalidade e até mesmo a produtividade de árvores individuais (DURLO; DENARDI, 1998).

A morfometria de indivíduos florestais fornece dados e subsídios básicos para que se estime a produção de biomassa da copa dessas árvores (ORELLANA; KOEHLER, 2008).

No âmbito dos tópicos levantados, duas perguntas centrais a este trabalho são levantadas: Que alternativa há, igualmente eficaz, ao uso da altura dominante de Assmann para a classificação de unidades produtivas? Quais usos práticos podem ser dados às relações morfométricas dos indivíduos florestais?

Buscando relacionar estas duas questões, o presente trabalho se propõe a estudar a correlação de índices morfométricos com o volume estocado de madeira, utilizando estes índices em métodos de classificação de sítios florestais.

2. OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho se propõe a analisar a eficiência de índices morfométricos e variáveis morfométricas alternativas para a classificação de sítios florestais em povoamento de *Eucalyptus urophylla* comparado ao uso de altura dominante para o mesmo fim, correlacionando estas variáveis ao volume.

2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, espera-se:

- Validar o desempenho da altura dominante para a classificação de unidades produtivas;
- Determinar uma variável alternativa para esta classificação.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Sítios Florestais

Segundo definição da Sociedade Americana de Engenheiros Florestais (*Society of American Foresters*, 1958), um sítio florestal consiste em uma área com determinada capacidade de produzir floresta ou outro tipo de vegetação de acordo com suas características e fatores ecológicos, sendo a combinação de condições bióticas, climáticas e edáficas desta área.

Além dos fatores ecológicos, a capacidade produtiva de um sítio florestal se dá em relação a uma dada espécie, sendo a estimativa do potencial produtivo de uma espécie em determinado local (SANTOS, 2012).

O conceito de sítio florestal pode ser dado de dois pontos de vistas diferentes: do ponto de vista ecológico o sítio florestal consiste em uma unidade geográfica uniforme, que apresenta como característica uma combinação estável de seus fatores, já do ponto de vista do manejo florestal o sítio florestal seria um fator de produção primário que apresenta certa capacidade de produzir madeira ou outros produtos florestais (SCHÖNAU, 1987).

Entretanto, Killian *et al.* (1984) estabeleceu que tais conceitos devem ser incorporados e entendidos de uma maneira única e complementar, a classificação de sítio utilizando o ponto de vista ecológico pode e deve preceder os conceitos de capacidade produtiva do local.

A maioria das espécies florestais, quando cultivadas em áreas que apresentem alta capacidade produtiva, apresentam um crescimento em altura mais elevado. Deste fato é possível inferir a existência de uma forte correlação entre a altura dos indivíduos dominantes da população e o sítio florestal (CAMPOS; LEITE, 2013).

3.1.1 Classificação e Índice de Sítio

Uma das atividades essenciais para a formação de povoamentos florestais é a realização da classificação de sítios florestais, visando a determinação de unidades produtivas, isso porque a qualidade de dado sítio caracteriza riscos, oportunidades e desafios a serem enfrentados pelo engenheiro florestal no manejo de um povoamento implantado naquela área (SANTOS, 2012).

Segundo Campos e Leite (2013), a classificação das unidades produtivas por meio do índice de sítio consiste na avaliação da qualidade da área, engloba e reflete todos os fatores ambientais no crescimento em altura, além de correlacionar tal qualidade com o volume. Sendo a medida de produtividade local utilizada com mais frequência em todo o mundo, o índice de sítio é útil como uma base importante em tomada de decisões, planejamento e estratégias no meio florestal (WATT *et al.*, 2015).

Nos últimos anos o emprego de alta tecnologia na obtenção de índices de sítio tem gerado diversos estudos e trabalhos envolvendo o uso de imagens de satélite e tecnologia LiDAR (do inglês *Light Detection And Ranging*) para a obtenção de medições de povoamentos florestais, inclusive a nível individual, para o cálculo de índice de sítio (WATT *et al.*, 2015; VÉGA; ST-ONGE, 2009).

Outro recente e inovador estudo na área é o conduzido por Cosenza *et al.* (2015) que também aplica novas metodologias na classificação de capacidade produtiva de sítios florestais,

utilizando máquina de vetor de suporte e redes neurais artificiais, ferramentas de inteligência computacional (IC) pouco utilizadas em classificação de unidades produtivas. Para tal, os autores também incluíram novas variáveis no sistema de classificação como tipo de solo e espaçamento. Os resultados do trabalho foram promissores, identificando a capacidade das técnicas de IC de classificar sítios de uma forma muito satisfatória.

O desenvolvimento de fundamentos matemáticos para conduzir a estimativa do crescimento de indivíduos florestais em dado sítio é possível devido às diferentes taxas de crescimento que as árvores apresentam ao longo de um período de tempo. De forma geral, o uso de técnicas de regressão múltipla ou não linear permitem tal descrição do crescimento (MIGUEL, 2009).

Estes modelos de produção desenvolvidos relacionam a capacidade produtiva da área com a curva de crescimento em altura dominante da população, dando origem assim às curvas de índice de sítio (TONINI *et al.*, 2006).

Segundo Jones (1969) as curvas de índice de sítio descrevem o comportamento do crescimento em altura de árvores hipotéticas dentro de dado sítio florestal, sendo que em algumas vezes, tabelas de altura e idade provenientes das curvas de sítio podem ser utilizadas para melhor entendimento da mesma. Além disso, é possível estimar o valor do índice de sítio por meio da interpolação de duas curvas de sítio.

A classificação de unidades produtivas e a geração de índice de sítio não se restringe ao uso de altura dominante como variável independente. A utilização do diâmetro das árvores dominantes para a classificação de sítios em povoamentos clonais de eucalipto se mostrou eficiente, apresentando resultados coerentes aos obtidos com o uso de altura dominante, sendo que a correlação entre ambas as variáveis com área basal e volume podem apresentar resultados similares (LEITE *et al.*, 2011).

Plantios florestais presentes em sítios de melhor qualidade – maior índice de sítio – apresentam um incremento superior em área basal. Entretanto, já se tem o conhecimento de que o valor máximo de área basal a ser atingido varia de acordo com a espécie implantada, ou seja, aqueles sítios com qualidade inferior tem capacidade de atingir os mesmos valores máximos, porém em um maior espaço de tempo (CALDEIRA *et al.*, 1996).

3.2 Variáveis e Índice do Povoamento.

3.2.1 Altura Dominante

Esta é uma variável que tem sido amplamente utilizada no meio florestal, principalmente no processo de classificação da qualidade produtiva de áreas florestais, tanto

por sua correlação significativa com a produção total em volume, quanto pela capacidade das árvores dominantes serem pouco influenciadas por tratos silviculturais (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2006).

Como árvores dominantes podemos dizer aquelas que geralmente apresentam copas com bom desenvolvimento, porém com menor comprimento quando comparadas com árvores de outros estratos verticais, devido ao sombreamento da parte inferior causado pela camada superior, o que diminui a projeção de copa (WEBER *et al.*, 2013).

Diferentes conceitos de altura dominante já foram apresentados na literatura (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2006), todos descritos como metodologia de cálculo desta variável. Como retromencionado neste trabalho, é quase consensual definir altura dominante pelo conceito de Assmann (1970).

O amplo uso da altura dominante abre caminho para os mais diversos estudos sobre a variável. Ferraz Filho *et al.* (2011) apresentaram potenciais avanços na obtenção de altura dominante ao inserirem variáveis climáticas a modelos estimadores. Segundo os autores, a versão do modelo de Chapman e Richards que utilizava dados de precipitação e radiação solar apresentou maior precisão nas estimativas de altura dominante, e apontam ainda o potencial desses resultados ao evidenciarem que, apesar de deficiente para estimativas futuras devido a incapacidade de prever condições climáticas, a utilização dessa versão do modelo pode ajudar a prever a produtividade até mesmo em áreas sem cultivo prévio.

Já Weber *et al.* (2013) utilizaram altura dominante como variável independente na descrição de diretrizes para desbaste de *Pinus taeda* em diversos municípios dos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina e demonstraram a eficiência desta nova metodologia.

3.2.2 Altura de Lorey

Machado e Figueiredo Filho (2006) definem a altura de Lorey como uma altura média ponderada com as áreas basais das classes de diâmetro. Esta altura pode ser obtida por meios matemáticos ou mediante o uso de um Relascópio de Bitterlich, aparelho cujo qual já fornece o valor de Lorey como altura média das árvores.

Os autores ainda reforçam o estabelecido em trabalhos anteriores ao evidenciar a utilidade desta medição na estimativa do valor de volume feita diretamente do povoamento por meio de equações de povoamento, isto é, quando, geralmente, o volume por unidade de área é estimado em função da área basal por unidade de área e uma altura média, neste caso a de Lorey.

3.2.3 Diâmetro Dominante

A definição de Diâmetro Dominante (Ddom) está muito ligado ao conceito empregado para árvores dominantes, o que pode variar de autor para autor.

Ao descrever árvores dominantes segundo o princípio de Assmann (1970), Machado e Figueiredo Filho (2006) estabelecem Ddom como sendo o diâmetro médio das 100 árvores mais grossas por hectare, deixando claro que o número de árvores utilizadas para o cálculo é proporcional ao tamanho da área de estudo.

Já Leite *et al.* (2011) definiram diâmetro dominante em seu trabalho como sendo a média aritmética dos diâmetros das 5 árvores dominantes por parcela. Por árvore dominante os autores entenderam aquelas que, em uma primeira medição, se apresentaram sadias, com fuste bem definido, sem bifurcação e tortuosidade, livre de danos e com copa situada no dossel superior, recebendo radiação solar direta.

O emprego de Ddom pode ser feito em diversas áreas. Souza *et al.* (2012) comparou a qualidade de madeira serrada oriunda de árvores dominantes e árvores médias quando submetida ao processo de secagem, a seleção destas árvores foram feitas por meio do Ddom e diâmetro médio. Os autores verificaram que a magnitude de defeitos como rachadura de topo e arqueamento das tábuas foi maior em tábuas de árvores médias, fazendo a madeira das árvores dominantes superior no processo de secagem.

O próprio trabalho de Leite *et al.* (2011), como retromencionado, emprega Ddom para a classificação de unidades produtivas. Os autores encontraram evidências de que o uso da variável para tal função é viável.

3.2.4 Diâmetro Médio Quadrático

O diâmetro médio quadrático (Dg) representa o diâmetro da árvore com área transversal média dentre as árvores estudadas, e tem sua importância no fato de a árvore média representada por Dg ser aquela que mais se aproxima das características da árvore de volume médio dentre um povoamento florestal. Dg é sempre maior que o valor da média dos diâmetros (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2006).

O conceito de Dg é utilizado há muito tempo. Há cerca de 160 anos atrás, na Alemanha, vários métodos de “árvore-média” eram utilizados para estimar o volume de povoamentos. Colocando de forma simples, o Engenheiro Florestal deveria escolher uma árvore, ou um grupo de árvores, que apresentasse padrões médios do povoamento, abatê-la e mensurar seu volume. Este volume seria multiplicado pelo número de indivíduos no povoamento. O método da árvore modelo é o Dg. Diâmetro médio quadrático fornece mais peso a árvores de maior medidas, e a

diferença entre ele e a média dos diâmetros (D_m) depende da variância entre os diâmetros do povoamento ou da parcela. Quando esta variância é pequena, D_g e D_m são muito próximos. Já em povoamentos com diâmetros maiores e grande variabilidade de diâmetros, a diferença entre D_g e D_m é substancial (CURTIS; MARSHALL, 2000).

3.3 Índices Morfométricos

No panorama atual da produção e manejo de espécie florestais nativas, conhecer sobre a morfometria, suas relações e toda a dinâmica por trás do formato da plantas é de suma importância para qualquer um que queira aprimorar intervenções silviculturais (ROMAN *et al.*, 2009).

As dimensões de copa têm considerável importância para fins de manejo, sendo que há vários índices obtidos de relações entre dimensões de copa e dimensões de tronco que são determinados a fim de descrever a capacidade de crescimento e produção dos indivíduos e do povoamento (PADOIN; FINGER, 2010).

Existem poucos estudos no meio científico brasileiro que buscam relacionar essas variáveis morfométricas menos conhecidas, como grau de esbeltez, índice de saliência, índice de abrangência e formal de copa, com as variáveis de mais fácil obtenção, como diâmetro a altura do peito e altura (TONINI; ARCO-VERDE, 2005).

O Grau de Esbeltez (GE) é dado pela relação entre altura e o diâmetro a altura do peito da árvore. Quando superior a 1 este índice indica que o crescimento da árvore em diâmetro é reduzido quando comparado ao crescimento em altura, o que também pode indicar a necessidade de desbaste (TONINI; ARCO-VERDE, 2005).

Índice de Saliência (ISa) representa a relação entre o diâmetro da copa e o diâmetro à altura do peito e expressa quantas vezes o diâmetro da copa é maior que o DAP. Além disso, havendo correlação significativa entre as variáveis independentes deste índice, este pode ser utilizado para determinar o número máximo de árvores na área quando o manejo é feito baseado pelo diâmetro atingido pelos indivíduos de um povoamento, podendo assim ser utilizado como indicador de desbaste (DURLO; DENARDI, 1998). Os autores completam afirmando que o ISa elevado ao quadrado resulta no chamado índice de espaço vital, que quanto menor for, maior será a área basal de um povoamento e, por conseguinte, o volume por hectare.

A relação entre diâmetro de copa e altura é chamada índice de abrangência (IA), que segundo Durlo e Denardi (1998), também pode ser utilizado como indicador de desbaste se houver significância na correlação entre IA e a altura das árvores do povoamento. O IA apresenta proporção inversa ao crescimento de altura, isso devido ao fato de o crescimento em

altura não ser acompanhado pelo crescimento em diâmetro de copa (TONINI; ARCO-VERDE, 2005).

Formal de Copa (FC) é o nome dado à relação entre diâmetro de copa e altura de copa. Dentre os quatro índices morfométricos, o formal de copa apresenta uma relação mais próxima à produtividade das árvores, pois, segundo Durlo e Denardi (1998), em um quadro que se considera a mesma espécie em um mesmo sítio, o indivíduo que apresentar o menor formal de copa também apresentará uma melhor produtividade.

O estudo de Padoin e Finger (2010) apresentou uma relação diretamente proporcional entre diâmetro de copa e altura dominante. Este fato levanta a possibilidade de uma forte correlação entre altura dominante e formal de copa.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Caracterização da Área de Estudo

A área de estudo consiste em plantios clonais de *Eucalyptus urophylla*, com espaçamento de 3,1 x 2 m e pertencentes a empresa do Grupo Anglo American (CODEMIN), localizados no município de Niquelândia no estado de Goiás (Figura 1), onde foram realizados inventários florestais contínuos entre os anos de 2011 e 2014.

O solo da região é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, não hidromórfico com horizonte B latossólico, apresentando relação Ki baixa, inferior a 1,9, e variação na coloração que parte do vermelho até o amarelo, com gamas intermediárias. Este tipo de solo é geralmente profundo ou muito profundo, apresentando uma sequência de horizontes A, B e C, e com transições difusas e graduais entre subhorizontes. São solos bem drenados. (EMBRAPA, 2013).

O clima local, segundo a classificação de Köppen (Köppen; Geiger, 1928), é do tipo Aw com duas estações bem definidas, uma seca que dura de maio a agosto e outra chuvosa, no restante do ano. A temperatura média anual é de 25°C e a precipitação é de 1700 mm.

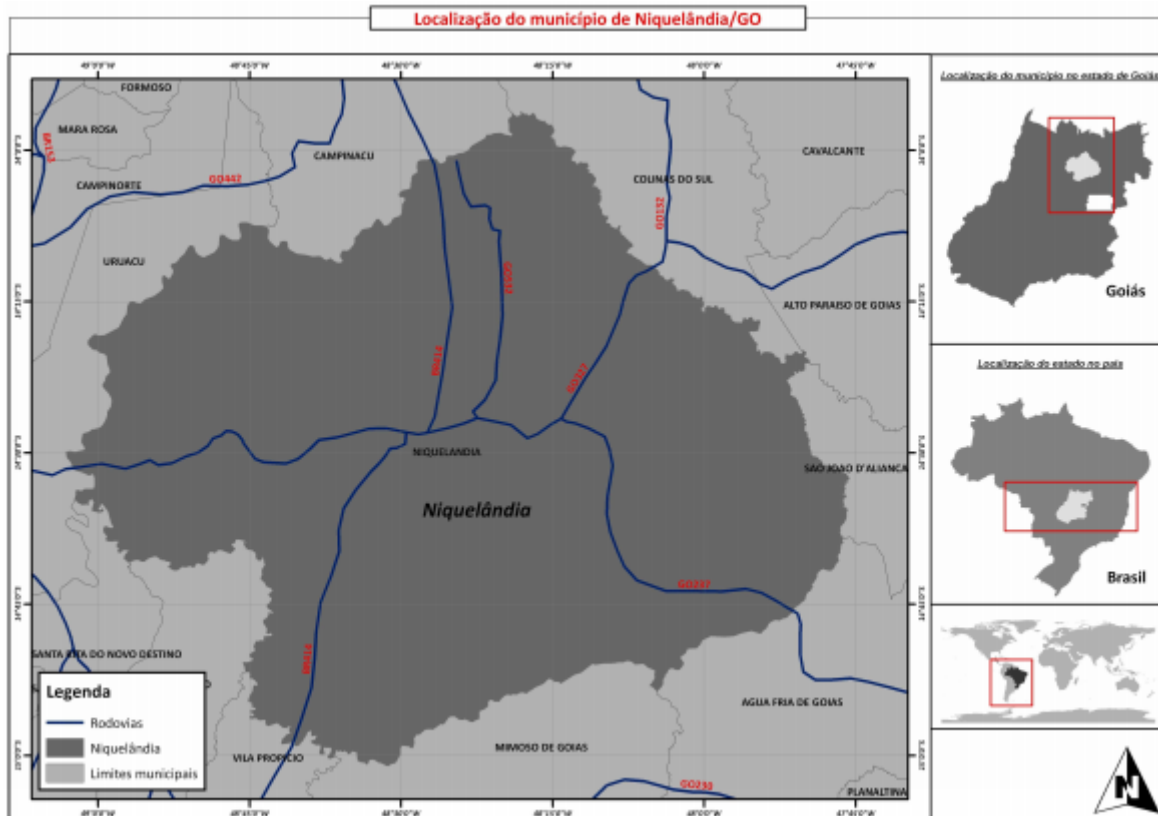


Figura 1. Localização da área de estudo, município de Niquelândia (MIGUEL, 2009).

4.2 Amostragem

A amostragem na área foi realizada segundo o método de área fixa, onde foram aleatoriamente instaladas 21 parcelas permanentes de formato retangular com 496 m² de área útil entre 9 talhões demarcados no povoamento. A amostragem foi realizada nas mesmas parcelas entre os anos de 2011 e 2014, quando o povoamento apresentava idades de 36, 48, 60 e 72 meses.

Todas as árvores amostradas tiveram as variáveis diâmetro à altura do peio (DAP), altura comercial/copa (Hc), altura total (Ht) e diâmetro de copa (DC) mensuradas ano a ano. Os DAPs foram medidos utilizando suta métrica, enquanto as alturas – comercial e total – foram mensuradas utilizando hipsômetro.

Para obter os valores de diâmetro de copa foi utilizada metodologia similar à empregada por Sanquetta *et al.* (2014) em seu estudo com indivíduos de Acácia-negra. Em cada uma das 21 parcelas foram selecionadas 10 árvores ao acaso, para cada uma das 210 árvores selecionadas foram medidos 8 raios de suas copas utilizando fita métrica. Por raio de copa se entende a distância de projeção de um ponto mais externo da copa no solo em relação ao fuste da árvore. Desta forma definimos o DC de cada árvore como sendo o dobro da média dos raios

mensurados. Para as demais árvores nas parcelas o valor de DC foi obtido por estimativa. Padoin e Finger (2010) também aplicaram a metodologia dos 8 raios em seu trabalho, calculando o diâmetro de copa médio das árvores dominantes de suas unidades amostrais.

Para estimar o diâmetro de copa das demais árvores amostradas foram ajustados dois modelos mencionados pelos autores como sendo comumente utilizados em estudos na predição de diâmetro de copa (Tabela 1).

A escolha do melhor modelo se deu através de critérios tradicionais utilizados para verificar a qualidade de ajustes, na mesma sequência de importância descrita por Draper e Smith (1981): i) Análise gráfica dos resíduos; ii) Erro padrão residual absoluto (S_{yx}) e percentual ($S_{yx\%}$), com preferência pelo modelo apresentando menor erro; iii) Coeficiente de determinação ajustado (R^2_{ajst}), com preferência pelo modelo apresentando maior valor do coeficiente.

Tabela 1. Modelos utilizados na estimativa de diâmetro de copa.

Modelos	
(1)	$DC = \beta_0 + \beta_1 \cdot DAP + \varepsilon$
(2)	$DC = \beta_0 + \beta_1 \cdot DAP + \beta_2 \cdot DAP^2 + \varepsilon$

DC = diâmetro de copa estimado; DAP = diâmetro a 1,30m; β_0 , β_1 , β_2 = parâmetros a estimar.

O modelo escolhido (modelo 1) foi utilizado para a estimativa de DC das demais árvores amostradas. Este procedimento foi repetido, utilizando as mesmas 210 árvores na medição de raios de copa, em todos os anos amostrados.

4.3 Obtenção de Variáveis e Índices Morfométricos

4.3.1 Altura Dominante

Dentro do conjunto de dados provenientes da amostragem foi aplicada a metodologia proposta por Assmann (1970) de cálculo da altura dominante (H_{dom}) como sendo a média das alturas das 100 árvores mais grossas por hectare. Devido ao tamanho reduzido das parcelas foram utilizadas apenas as 5 árvores mais grossas para o cálculo.

4.3.2 Altura de Lorey

Para o cálculo da Altura média de Lorey (HL) foi empregada a seguinte equação (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2006; ENCINAS et al., 2002):

$$HL = \frac{\sum(g_i h_i)}{\sum g_i} \quad (1)$$

onde: g_i = área seccional na i -ésima árvore da parcela; h_i = altura total da i -ésima árvore da parcela; $\sum g_i = G$ = área basal da parcela.

Este cálculo foi aplicado em todas as parcelas estratificadas, logo, foram obtidos 84 valores de HL.

4.3.3 Diâmetro Dominante

A obtenção dos diâmetros dominantes (D_{dom}) foi feita adaptando a metodologia de H_{dom} de Assmann (1970).

As mesmas 5 árvores selecionadas no item 4.3.1 por parcela foram utilizadas, sendo que neste caso foi calculada a média aritmética dos diâmetros das mesmas.

4.3.4 Diâmetro Médio Quadrático

O cálculo para determinar o valor de diâmetro médio quadrático (D_g) por parcela foi feito aplicando a equação (2) (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2006).

$$D_g = \sqrt{4 \cdot \bar{g} / \pi} \quad (2)$$

onde: \bar{g} = média aritmética das áreas seccionais dos indivíduos da parcela; $\pi \approx 3,14159$.

4.3.5 Média dos Diâmetros

Com os dados já estratificados foi calculada a média aritmética dos diâmetros dos indivíduos por parcela em cada ano. Desta forma foram obtidos 84 valores de média dos diâmetros (D_m).

4.3.6 Índices Morfométricos

Os valores de índices morfométricos foram calculados para cada árvore seguindo as equações (3 – 6), desenvolvidas por Burger (1939 *apud* DURLO; DENARDI, 1998) segundo

o modelo de árvore (Figura 2) desenvolvido pelo mesmo autor. O valor geral da parcela para cada ano foi obtido pela média aritmética dos valores de cada árvore.

Grau de Esbeltez (GE):

$$GE = HT/DAP \quad (3)$$

Índice de Saliência (ISa):

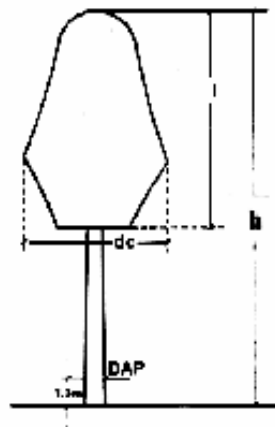
$$ISa = DC/DAP \quad (4)$$

Índice de Abrangência (IA):

$$IA = DC/Ht \quad (5)$$

Formal de Copa (FC):

$$FC = DC/Hc \quad (6)$$



$h = Ht =$ Altura total da árvore (m);
 $DAP =$ Diâmetro a altura do peito (m);
 $l = Hc =$ Altura de copa (m);
 $DC =$ Diâmetro de copa (m);

Figura 2. Modelo das características dimensionais de uma árvore.

A fim de otimizar a comparação entre os índices, estes foram ajustados para que todos apresentassem valores na casa das dezenas. Desta forma, o único índice que não sofreu alteração em seu valor original foi o índice de saliência. Tal ação permitiu também uma melhor comparação destas variáveis com a altura dominante e as demais medições tomadas nas árvores.

4.4 Volumetria

Para estimar o volume por hectare do povoamento estudado foi realizado procedimento de regressão de modelos volumétricos (Tabela 2) utilizando como base dados provenientes da

cubagem realizada em cada ano amostral. A cubagem feita seguiu o método de Smalian e utilizou, em média, 56 árvores por ano.

Para a regressão e ajuste dos modelos foi utilizado o software estatístico Statistica 7 e a escolha da melhor equação ajustada seguiu os parâmetros descritos por Draper e Smith (1981), já mencionados neste trabalho.

Foi feito um único ajuste para cada modelo, compilando as bases de dados de todos os anos e utilizando os dados de 80% das árvores cubadas, os demais 20% foram utilizados para a validação do modelo escolhido.

Tabela 2. Modelos volumétricos ajustados

Autor	Modelo
Schumacher & Hall	$V = \beta_0 \cdot DAP^{\beta_1} \cdot Ht^{\beta_2} + \varepsilon$
Spurr	$V = \beta_0 + \beta_1 \cdot DAP^2 \cdot Ht + \varepsilon$
Husch	$V = \beta_0 \cdot DAP^{\beta_1} + \varepsilon$

V = volume estimado; DAP = diâmetro a 1,30m; Ht = altura total; β_0 , β_1 , β_2 = parâmetros a estimar.

4.5 Área Basal

O valor de área seccional (g) de cada árvore foi obtido segundo a formula (7). A área basal (G) de cada parcela foi obtida pela soma dos valores de g de cada árvore da parcela.

$$g = \pi \cdot DAP^2 / 40000 \quad (7)$$

onde: DAP = diâmetro tomado à 1,30 m do solo; $\pi \approx 3,14159$.

4.6 Correlação Entre Variáveis

Antes mesmo de processar a classificação das unidades produtivas, as variáveis estudadas – Hdom, HL, Ddom, Dg, Dm, GE, IA, ISa e FC – foram submetidas à construção de uma matriz de correlação, a fim de avaliar a existência de correlação significativa para α 0,05, entre esses valores e o volume por parcela. Utilizando o software Statistica 7 foram construídas 4 matrizes de correlação, uma para cada ano amostral. A idade de 6 anos foi utilizada de referência, e variáveis que apresentaram correlação não significativa foram descartadas.

4.7 Classificação de Sítio

Para a classificação de sítios foram ajustados 5 modelos sigmoidais e o método da curva guia foi utilizado para classificar as unidades produtivas (Tabela 3) utilizando o software CurveExpert e seguindo os mesmos parâmetros de seleção dos modelos volumétricos já descritos.

Tabela 3. Modelo ajustados para expressar a capacidade produtiva dos sítios florestais.

Modelo	Equação
Relação de Gompertz	$Y = \beta_0 \cdot e^{-e^{\beta_1 - \beta_2 \cdot Id}}$
Logístico	$Y = \frac{\beta_0}{(1 + \beta_1 \cdot e^{-\beta_2 \cdot Id})}$
MMF	$Y = \frac{(\beta_0 \cdot \beta_1 + \beta_2 \cdot Id^{\beta_3})}{(\beta_1 + Id^{\beta_3})}$
Richards	$Y = \frac{\beta_0}{(1 + e^{\beta_1 - \beta_2 \cdot Id})^{1/\beta_3}}$
Weibull	$Y = \beta_0 - \beta_1 \cdot e^{-\beta_2 \cdot Id^{\beta_3}}$

Y = variável estimada; Id = idade da medição; β_0 , β_1 , β_2 = parâmetros a estimar.

Os modelos sigmoidais foram escolhidos devido a sua capacidade inerente de descrever de maneira adequada o crescimento de organismos, seja ele florestal ou não. Sorato (2013) afirma que, sob o fornecimento estável de recursos, o crescimento de um organismos se apresenta na forma de uma curva sigmoide, uma vez que estas curvas se expandem lentamente em seu início, atingindo o seu ponto máximo em uma assíntota superior, após passar por um ponto de inflexão, sendo este um princípio da Lei dos Rendimentos Decrescentes.

O ajuste destes modelos foi realizado utilizando as variáveis que passaram pelo teste de correlação como a variável independente “Y”. A escolha do melhor modelo, bem como o procedimento de classificação de sítios, foi realizada para cada variável segundo os critérios estabelecidos por Draper e Smith (1981). O procedimento de classificação de sítio foi realizado em ambiente Microsoft Office Excel.

4.8 Prognose

A fim de dar base à validação da classificação de sítio, foi realizada a prognose da produção florestal no povoamento para todas as idades amostradas. O modelo ajustado foi o proposto por Clutter (8).

$$\text{Ln}V_2 = \beta_0 + \beta_1 \text{IS}^{-1} + \beta_2 \text{Id}_2^{-1} + \beta_3 \left(\frac{\text{Id}_1}{\text{Id}_2} \right) \text{Ln}G_1 + \beta_4 \left(1 - \frac{\text{Id}_1}{\text{Id}_2} \right) + \beta_5 \left[\left(1 - \frac{\text{Id}_1}{\text{Id}_2} \right) \cdot \text{IS} \right] + \varepsilon \quad (8)$$

onde: $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ = parâmetros a estimar; V_2 = volume no ano 2; Id_1 = idade no ano 1; Id_2 = idade no ano 2; IS = índice de sítio; G_1 = área basal no ano 1.

O ajuste do modelo de Clutter e o processo de prognose foram realizados para cada variável “Y”, utilizando 15 das 21 parcelas amostradas, em ambiente Microsoft Excel.

As 6 parcelas remanescentes foram utilizadas para validação do modelo e análise das estatísticas de precisão. Esse conjunto de validação é composto por duas das parcelas mais produtivas, duas das parcelas de produtividade intermediária e duas das parcelas menos produtivas, escolhidas ao acaso e levando em consideração o volume estimado no item 4.4.

4.9 Avaliação das Variáveis

A adequabilidade dos índices morfométricos para o uso em classificação de sítios florestais, bem como a comparação do seu uso com o uso da altura dominante foi avaliada em três passos.

Primeiramente utilizando o resultado do teste de correlação, descrito no item 4.6 deste trabalho, pelo qual variáveis poderiam ser descartadas das etapas subsequentes.

Em seguida, a partir dos resultados do procedimento de prognose, foram analisadas as estatísticas de precisão do ajuste do modelo de Clutter, assim como o critério da diferença agregada em porcentagem ($\text{Da}\%$) e do erro médio absoluto (Ei) para as parcelas de validação.

A diferença agregada (Da), é uma estatística usada como índice de ajuste de modelos, corresponde à diferença entre o somatório dos valores observados e o somatório dos valores estimados, servindo como critério indicador de sub ou superestimativas, e no presente trabalho a mesma foi obtida na forma percentual, para melhor visualização. Também foram analisados os erros médios (Ei) gerados pelas diferentes variáveis utilizadas na classificação as unidades produtivas (Sítios). Valores de (Ei) próximos de zero é o desejável, sempre que possível, pois mostra a capacidade dos modelos em estimar as variáveis de interesse com acurácia.

Posteriormente os valores de volume foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA) em arranjo fatorial com blocos (Sítios) de modo que foi possível verificar a

existência ou não de diferença significativa entre valores reais e estimados de volume, bem como se há diferença significativa entre a estimativa feita por meio de índices morfométricos (proposto) e a altura dominante (tradicional).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Volumetria

A figura 3 apresenta a dispersão das estimativas de volume geradas pelo ajuste dos modelos, primeiro critério estipulado por Draper e Smith (1981). A tabela 4 apresenta os resultados encontrados no ajuste dos modelos volumétricos propostos para os demais critérios estatísticos.

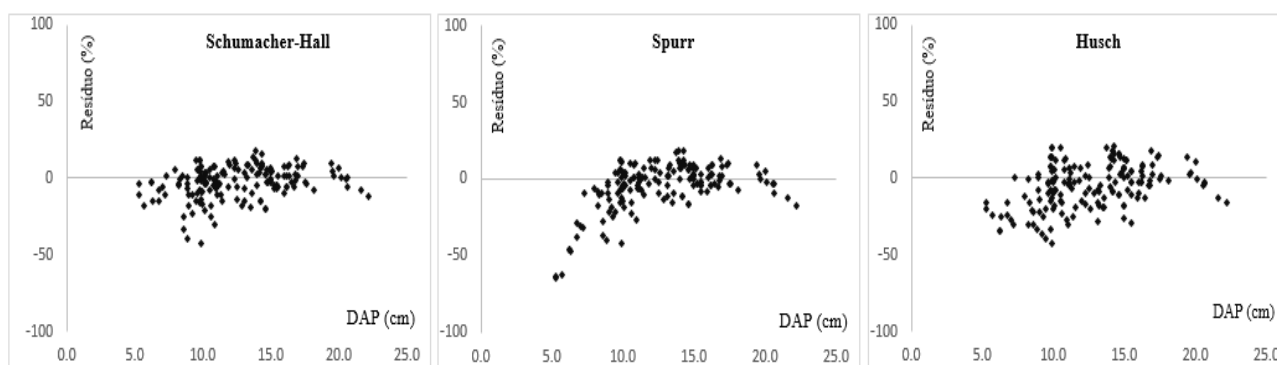


Figura 3. Distribuição dos resíduos percentuais em função do diâmetro à altura do peito para as três funções volumétricas testadas.

Tabela 4. Coeficientes dos modelos ajustados com suas estatísticas de ajuste e precisão para estimativa do volume.

Modelos	Ajuste	Syx (m ³)	Syx%	R ² ajustado
Schumacher & Hall	$V = 0,000061 \cdot DAP^{1,678} \cdot Ht^{1,085}$	0,0125	9,27%	0,98088
Spurr	$V = 0,0119 \cdot 0,0000306 \cdot DAP^2 \cdot Ht$	0,0138	10,20%	0,97657
Husch	$V = 0,000318 \cdot DAP^{2,339}$	0,0177	13,11%	0,96153

V = volume estimada; DAP = diâmetro à 1,30 m do solo; Ht = altura total; Syx = Erro absoluto da estimativa; Syx% = erro percentual da estimativa.

É possível observar pelos gráficos de dispersão, o melhor ajuste para o modelo de Schumacher-Hall, o qual também apresentou os melhores resultados para Syx% e R²ajustado. Este modelo tem apresentado bons resultados em outros trabalhos realizados. Utilizando um

clone de *E. urophylla* x *E. grandis*, Sales *et al.* (2015) também encontraram em Schumacher-Hall o modelo mais adequado para a estimativa do volume no povoamento, assim como Azevedo *et al.* (2011) que, apesar de utilizar uma versão logaritimizada do modelo, também confirmaram Schumacher-Hall como o modelo com os melhores resultados estatísticos.

5.2 Correlação Entre Variáveis

Os resultados alcançados através das matrizes de correlação construídas para cada ano amostral são apresentados na tabela 5. Valores de correlação significativa encontram-se destacados.

Tabela 5. Resultados da correlação anual entre as variáveis estudadas e volume.

Variável	Vol - 3 anos	Vol - 4 anos	Vol - 5 anos	Vol - 6 anos
Hdom	0,47*	-0,32	-0,31	-0,31
HL	0,82*	0,11	0,20	0,20
Ddom	0,58*	-0,42	-0,35	-0,35
Dm	0,63*	0,54*	0,27	0,61*
Dg	0,56*	0,39	0,18	0,47*
GE	-0,51*	-0,62*	-0,69*	-0,69*
ISa	-0,78*	-0,72*	-0,75*	-0,75*
IA	-0,80*	-0,62*	-0,44*	-0,37
FC	0,32	0,40	0,51*	0,52*

*Correlação significativa ao nível de 0,05; Hdom = altura dominante; HL = altura de Lorey; Ddom = diâmetro dominante; Dm = média dos diâmetros; Dg = diâmetro médio quadrático; GE = grau de esbeltez; ISa = índice de saliência; IA = índice de abrangência; FC = formal de copa.

Em sua maioria, as variáveis estudadas apresentam valores de correlação oscilantes ou decrescentes. Utilizando o resultado para a floresta aos 6 anos como base para a avaliação, observamos as variáveis HL, Ddom e IA com correlação não significativa, desta forma estas foram excluídas das análises a partir deste ponto.

É interessante notar o resultado encontrado para a variável Hdom. Apesar de ser a variável mais utilizada no setor florestal para a classificação de sítio, ela aqui apresentou valores não significativo, o que representa uma baixa correlação entre a altura dominante de Assmann com o volume real e levanta a dúvida desta ser a melhor variável a representar a capacidade produtiva do local. Resultado esse que vai contra o difundido na literatura de Hdom apresentar alta correlação com a variável volume (SCOLFARO, 2006; MARTINS, 2006; MIGUEL, 2009; SANTOS, 2012).

Além disso, a inversão da proporcionalidade da correlação de Hdom com o volume a partir do ano 3 pode ser explicada por uma possível estabilização da altura, enquanto o volume continuou a crescer.

Apesar deste cenário, ainda consideramos Hdom no decorrer deste estudo a fim de validar os objetivos específicos deste trabalho e devido ao uso recorrente desta variável para a classificação de unidades produtivas.

É válido salientar também a correlação negativa apresentada pelos índices morfométricos GE, ISa e IA, o que indica uma relação inversamente proporcional entre estas variáveis e o volume. Este fato vai de encontro com o encontrado por Wink *et al.* (2012), que observaram a diminuição dos valores destas mesmas variáveis com o crescimento das árvores de eucalipto. Outras variáveis que apresentam este comportamento com o passar dos anos são Hdom e Ddom, resultados estes considerados inesperados, uma possível causa efeito pode estar vinculada ao regime de manejo adotado, ou ausência de tratos silviculturais neste povoamento.

5.3 Classificação de Sítio

A análise gráfica de dispersão dos resíduos para os modelos de sítio propostos é apresentada nas figuras 4 a 9. Já o ajuste para os mesmos é apresentado nas tabelas de 6 a 11, junto das estatísticas de precisão calculadas para cada um. A sequência de apresentação dos resultados acompanha a ordem prioritária proposta por Draper e Smith (1981) e se referem, respectivamente, às variáveis Hdom, Dm, Dg, GE, ISa e FC.

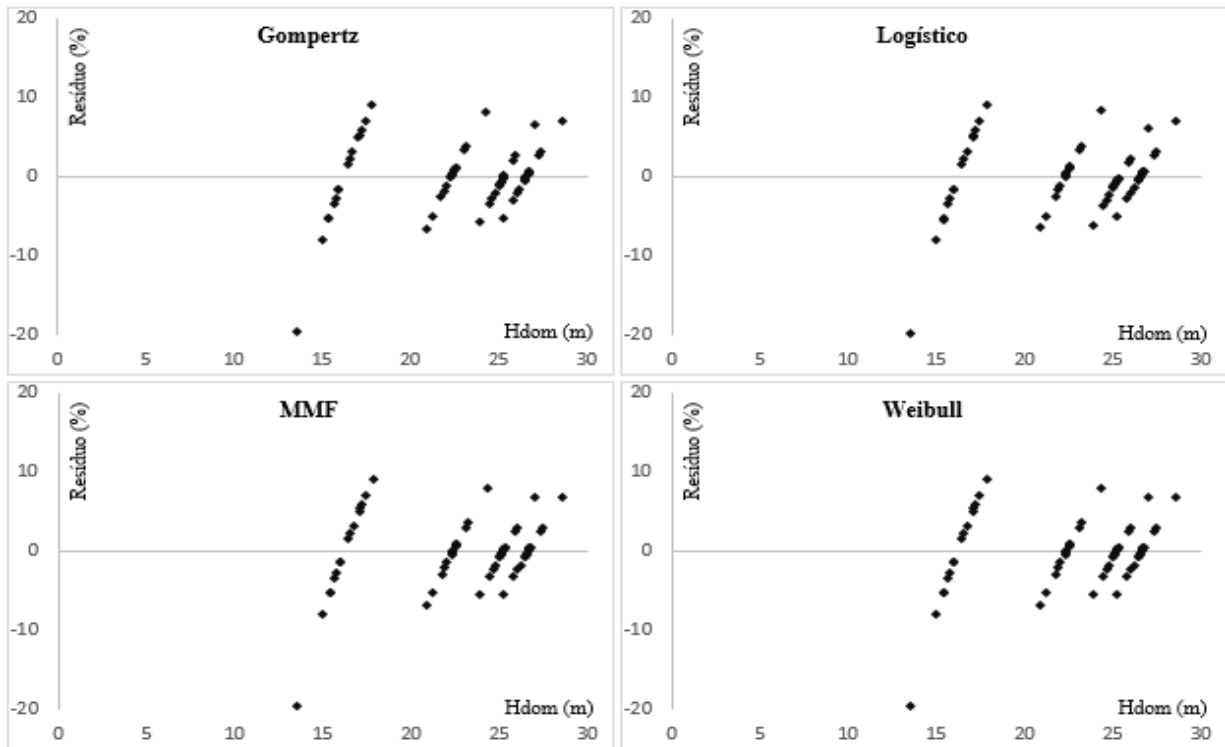


Figura 4. Distribuição dos resíduos percentuais em função da altura dominante para as quatro melhores funções testadas.

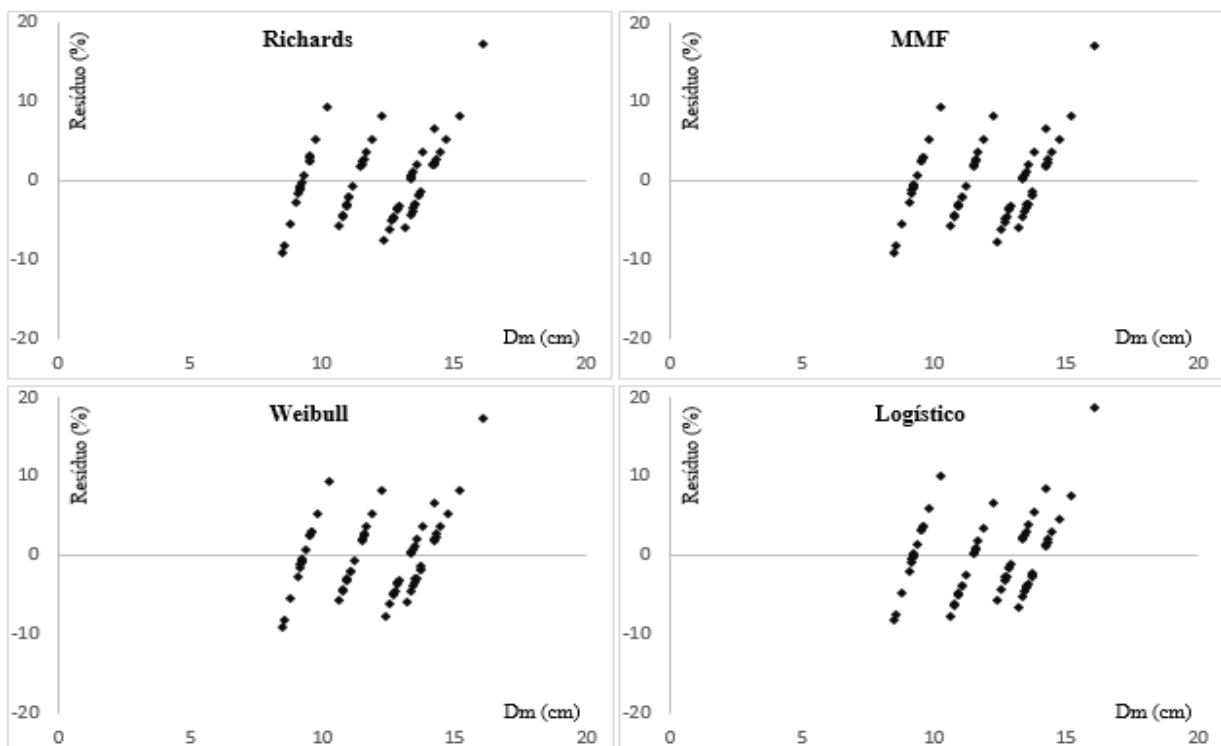


Figura 5. Distribuição dos resíduos percentuais em função da média dos diâmetros para as quatro melhores funções testadas.

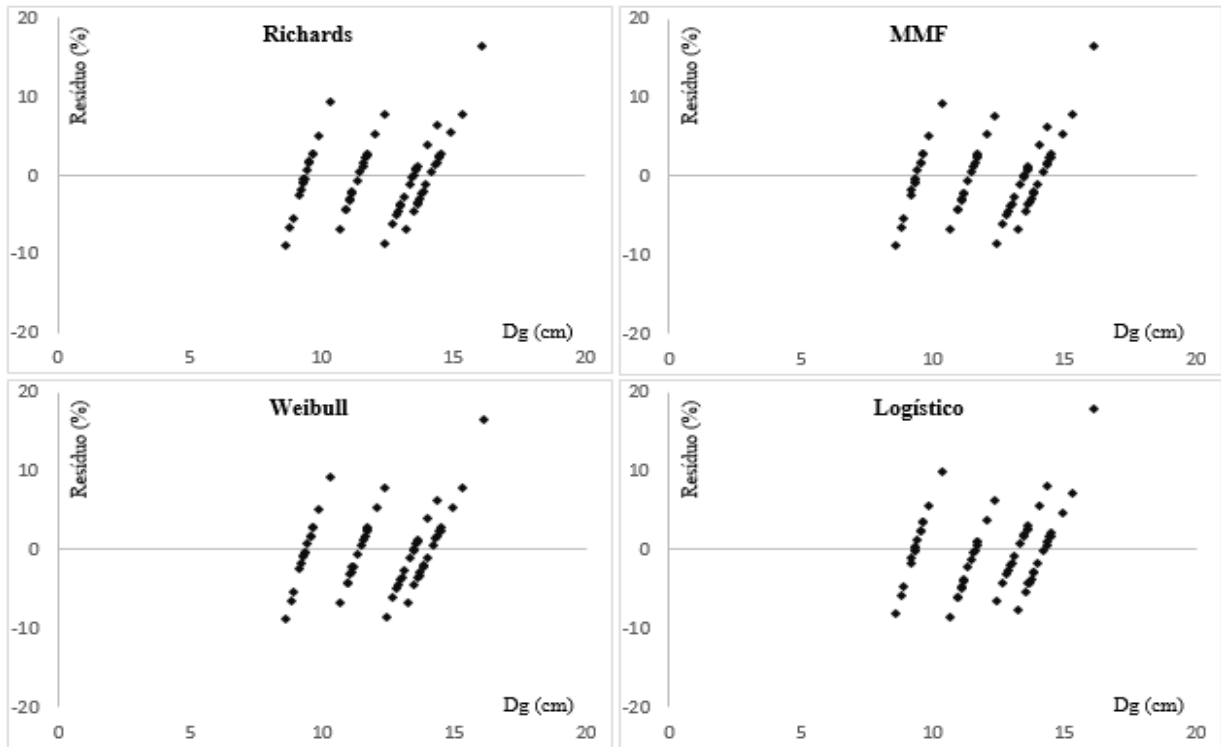


Figura 6. Distribuição dos resíduos percentuais em função do diâmetro médio quadrático para as quatro melhores funções testadas.

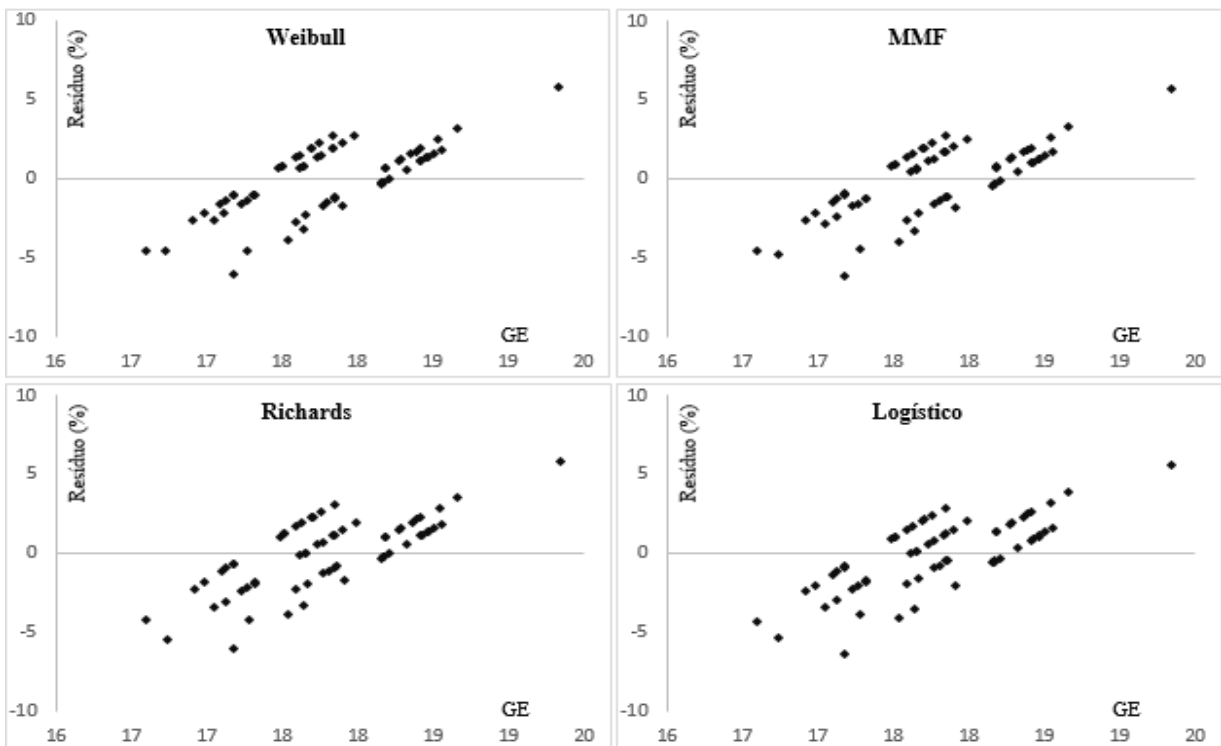


Figura 7. Distribuição dos resíduos percentuais em função do grau de esbeltez para as quatro melhores funções testadas.

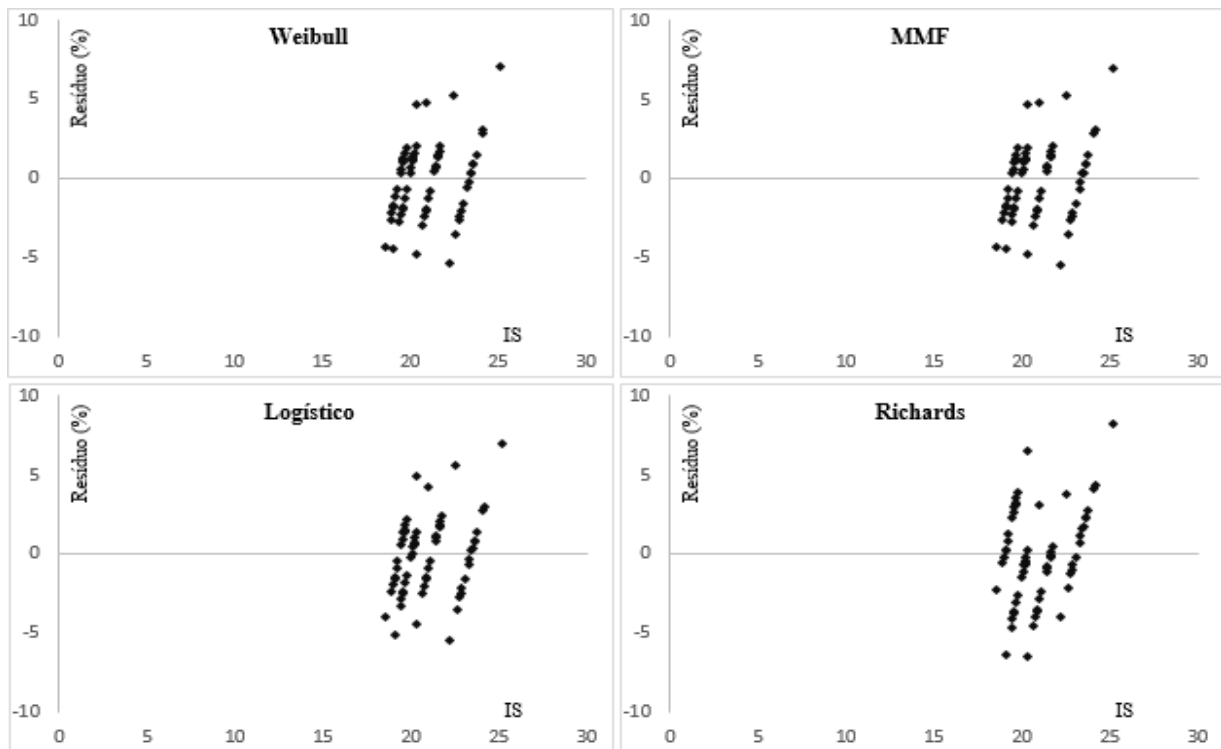


Figura 8. Distribuição dos resíduos percentuais em função do índice de saliência para as quatro melhores funções testadas.

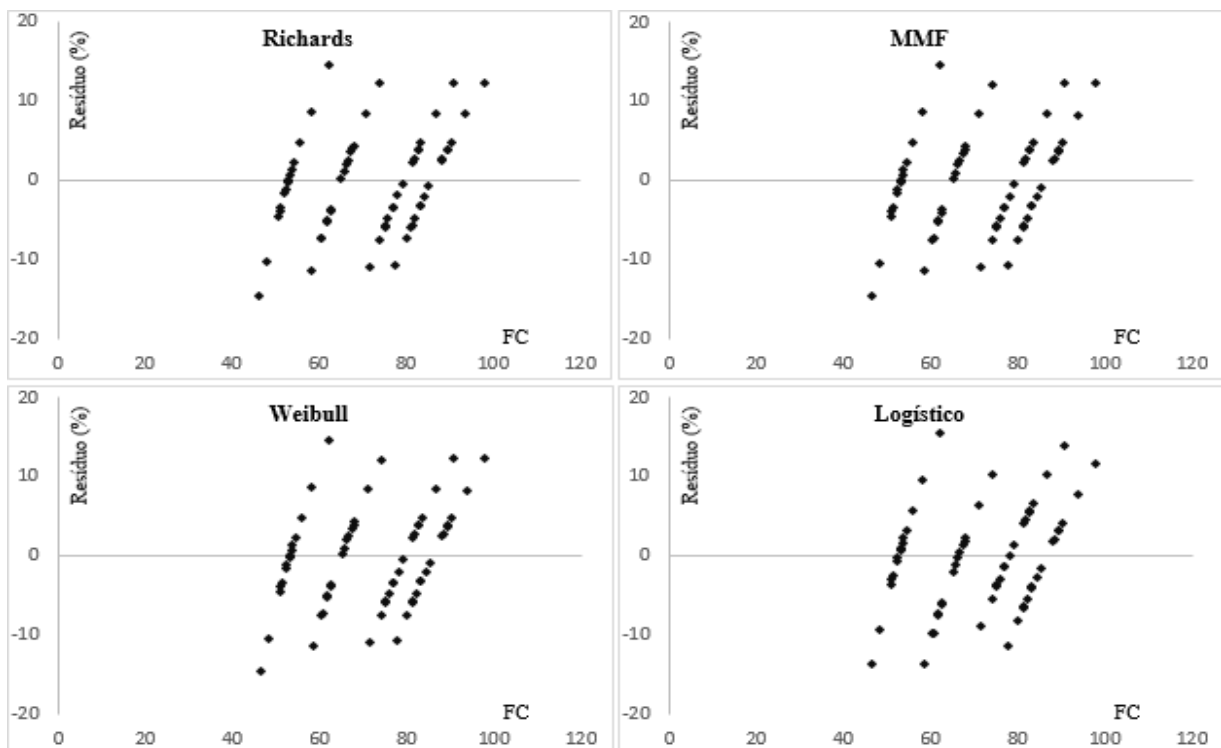


Figura 9. Distribuição dos resíduos percentuais em função do formal de copa para as quatro melhores funções testadas.

No caso dos modelos de sítio a análise gráfica da dispersão dos resíduos não proporciona evidências claras para a escolha do melhor modelo. Apesar de necessária, a análise gráfica pode apresentar a deficiência de subjetividade, uma vez que em casos como este é difícil ao observador identificar diferenças entre os pontos plotados no gráfico.

Desta forma a escolha dos modelos se deu através do segundo critério de Draper e Smith (1981). Como pode ser observado nas tabelas de resultados o modelo de Gompertz se mostrou o mais adequado à estimativa de Hdom. Já o modelo de Richards se destacou na estimativa de três variáveis: Dm, Dg e FC, enquanto o modelo de Weibull foi o escolhido para a estimativa das variáveis GE e ISa.

Nota-se que os modelos apresentaram valores de precisão semelhantes para todas as variáveis. Com a impossibilidade de indicar um melhor modelo segundo as estimativas de precisão, a escolha dos modelos foi feita preferindo aqueles com uso mais recorrente, além de levar e conta a facilidade de ajuste e uso do modelo.

Interessante notar que, apesar dos melhores valores para o erro percentual da estimativa, os modelos apresentaram baixíssimos valores de determinação (R^2 ajustado) para GE. Isto é, o grau de esbeltez das árvores amostradas é pouco explicado pela idade das mesmas. Isso se deve a uma baixa correlação entre GE e a idade das árvores. Ainda assim os resultados foram aceitos uma vez que se considerou os valores de $Syx\%$ suficientes para validar o ajuste dos modelos.

De forma geral, todos os modelos apresentaram bons ajustes e estatísticas de precisão, valores que comprovam quão adequados são os modelos sigmoidais para a classificação de sítio, devido ao seu comportamento gráfico que representa muito bem o crescimento de organismos.

Trabalhos como os de Machado *et al.* (2010) e Zamin (2013) confirmam esta premissa de crescimento. Os autores observaram em seus estudos o comportamento de crescimento sigmoidal em indivíduos de *Pinus taeda* e *Araucaria angustifolia*. Outros trabalhos com o gênero *Eucalyptus* também assumem a mesma escolha de modelos. Retslaff *et al.* (2015) e Scavinski (2014) determinaram o modelo sigmoidal de Chapman-Richards como o mais adequado para a classificação da qualidade produtiva em plantios de *E. grandis* no estado do Paraná, enquanto Miguel (2009) escolheu o mesmo modelo para classificação de povoamento de *E. urophylla* no estado de Goiás.

Tabela 6. Coeficientes dos quatro melhores modelos ajustados com suas estatísticas de ajuste e precisão para estimativa de altura dominante.

Modelos	Ajuste	Syx (m)	Syx%	R ² ajustado
Gompertz	$H_{dom} = 27,436 \cdot e^{-e^{2,165-0,935 \cdot Id}}$	0,83	3,68%	0,96
Logístico	$H_{dom} = \frac{27,152}{(1 + 19,825 \cdot e^{-1,126 \cdot Id})}$	0,83	3,69%	0,96
MMF	$H_{dom} = \frac{(-21,135 \cdot 7,809 + 28,874 \cdot Id^{2,852})}{(7,809 + Id^{2,852})}$	0,83	3,70%	0,96
Weibull	$H_{dom} = 28,439 - 599,052 \cdot e^{-2,064 \cdot Id^{0,576}}$	0,83	3,70%	0,96

Hdom = altura dominante; Id = idade da medição; Syx = erro absoluto da estimativa; Syx% = erro percentual da estimativa.

Tabela 7. Coeficientes dos quatro melhores modelos ajustados com suas estatísticas de ajuste e precisão para estimativa de média dos diâmetros.

Modelos	Ajuste	Syx (cm)	Syx%	R ² ajustado
Richards	$D_m = \frac{13,967}{(1 + e^{17,909-3,514 \cdot Id})^{1/17,991}}$	0,61	5,16%	0,90
MMF	$D_m = \frac{(8,906 \cdot 121784,782 + 14,148 \cdot Id^{8,299})}{(121784,782 + Id^{8,299})}$	0,61	5,16%	0,90
Weibull	$D_m = 13,969 - 5,663 \cdot e^{-0,000986 \cdot Id^{4,772}}$	0,61	5,16%	0,90
Logístico	$D_m = \frac{15,193}{(1 + 5,145 \cdot e^{-0,690 \cdot Id})}$	0,63	5,32%	0,89

Dm = média dos diâmetros; Id = idade da medição; Syx = erro absoluto da estimativa; Syx% = erro percentual da estimativa.

Tabela 8. Coeficientes dos quatro melhores modelos ajustados com suas estatísticas de ajuste e precisão para estimativa de diâmetro médio quadrático.

Modelos	Ajuste	Syx (cm)	Syx%	R ² ajustado
Richards	$Dg = \frac{14,151}{(1 + e^{16,813 - 3,307 \cdot Id})^{1/16,702}}$	0,59	4,93%	0,91
MMF	$Dg = \frac{(8,969 \cdot 94152,235 + 14,343 \cdot Id^{8,123})}{(94152,235 + Id^{8,123})}$	0,59	4,93%	0,91
Weibull	$Dg = 14,151 - 5,815 \cdot e^{-0,001144 \cdot Id^{4,676}}$	0,59	4,93%	0,91
Logístico	$Dg = \frac{15,376}{(1 + 5,205 \cdot e^{-0,692 \cdot Id})}$	0,61	5,08%	0,90

Dg = diâmetro médio quadrático; Id = idade da medição; Syx = erro absoluto da estimativa; Syx% = erro percentual da estimativa.

Tabela 9. Coeficientes dos quatro melhores modelos ajustados com suas estatísticas de ajuste e precisão para estimativa de grau de esbeltez.

Modelos	Ajuste	Syx	Syx%	R ² ajustado
Weibull	$GE = 18,214 - 0,889 \cdot e^{-858361,041 \cdot Id^{-9,433}}$	0,40	2,26%	0,46
MMF	$GE = \frac{(17,305 \cdot 0,0000000643 + 18,241 \cdot Id^{-10,988})}{(0,0000000643 + Id^{-10,988})}$	0,40	2,27%	0,46
Logístico	$GE = \frac{0,960}{(1 + (-0,950) \cdot e^{-0,00101 \cdot Id})}$	0,41	2,31%	0,43
Richards	$GE = \frac{18,214}{(1 + e^{-78,255 - (-22,965) \cdot Id})^{1/1140,665}}$	0,41	2,32%	0,43

GE = grau de esbeltez; Id = idade da medição; Syx = erro absoluto da estimativa; Syx% = erro percentual da estimativa.

Tabela 10. Coeficientes dos quatro melhores modelos ajustados com suas estatísticas de ajuste e precisão para estimativa de índice de saliência.

Modelos	Ajuste	Syx	Syx%	R ² ajustado
Weibull	$ISa = 23,595 - 4,597 \cdot e^{-872,787 \cdot Id^{-5,156}}$	0,53	2,55%	0,89
MMF	$ISa = \frac{(19,060 \cdot 0,000355 + 24,479 \cdot Id^{-5,992})}{(0,000355 + Id^{-5,992})}$	0,53	2,55%	0,89
Logístico	$ISa = \frac{18,200}{(1 + (-0,850) \cdot e^{-0,448 \cdot Id})}$	0,53	2,56%	0,89
Richards	$ISa = \frac{34,541}{(1 + e^{7,662 - (-2,363) \cdot Id})^{1/36,504}}$	0,64	3,08%	0,85

ISa = índice de saliência; Id = idade da medição; Syx = erro absoluto da estimativa; Syx% = erro percentual da estimativa.

Tabela 11. Coeficientes dos quatro melhores modelos ajustados com suas estatísticas de ajuste e precisão para estimativa de formal de copa.

Modelos	Ajuste	Syx (cm)	Syx%	R ² ajustado
Richards	$FC = \frac{85,980}{(1 + e^{37,779 - 6,845 \cdot Id})^{1/33,640}}$	4,61	5,51%	0,89
MMF	$FC = \frac{(50,261 \cdot 35076,793 + 89,091 \cdot Id^{7,196})}{(35076,793 + Id^{7,196})}$	4,61	5,51%	0,89
Weibull	$FC = 86,638 - 39,104 \cdot e^{-0,000842 \cdot Id^{4,729}}$	4,61	6,51%	0,89
Logístico	$FC = \frac{100,665}{(1 + 5,124 \cdot e^{-0,574 \cdot Id})}$	4,71	6,65%	0,88

FC = formal de copa; Id = idade da medição; Syx = erro absoluto da estimativa; Syx% = erro percentual da estimativa

A tabela 12 apresenta a classificação final das 21 parcelas amostradas em função da cada uma das variáveis estudadas, enquanto os índices de sítio (IS) gerados pela classificação estão presentes na tabela 13, também dados em função destas mesmas variáveis, utilizando o método da curva guia.

Tabela 12. Classificação de sítio adotados para as parcelas amostradas em função das variáveis estudadas.

Classificação de Sítio						
Parcela	Hdom	Dm	Dg	GE	ISa	FC
1	III	III	II	II	II	III
2	II	II	II	II	II	III
3	II	III	III	II	II	III
4	II	III	III	II	II	III
5	II	II	I	I	I	II
6	II	II	II	II	II	II
7	II	II	II	II	II	II
8	II	II	II	II	II	II
9	II	II	II	II	II	II
10	II	III	II	II	II	III
11	II	III	II	II	II	III
12	III	III	III	II	II	III
13	II	III	II	II	II	III
14	II	III	II	II	II	III
15	I	III	II	II	III	III
16	II	II	II	II	II	II
17	II	III	III	III	III	III
18	III	II	II	I	I	II
19	III	III	III	II	II	III
20	II	I	I	I	I	I
21	III	II	II	II	II	II

Tabela 13. Índices de sítio adotados para o povoamento em função das variáveis estudadas.

Variável	IS - Classe III	IS - Classe II	IS - Classe I
Hdom	25	27	29
Dm	13	14	15
Dg	13	14	15
GE	18,5	17,5	16,5
ISa	20,5	19,5	18,5
FC	80	91	120

IS = índice de sítio.

A escolha deste método se deu pela adequabilidade para a área de estudo. Miguel (2009) constata este fato ao estudar a mesma área e povoamento, utilizando um modelo sigmoidal (Chapman-Richards) para a classificação dos sítios da área utilizando o mesmo método.

É importante salientar que, devido a correlação negativa entre o volume e as variáveis GE e ISa os maiores valores de índice de sítio destas variáveis são atribuídos à classe III, enquanto os menores valores pertencem à classe I.

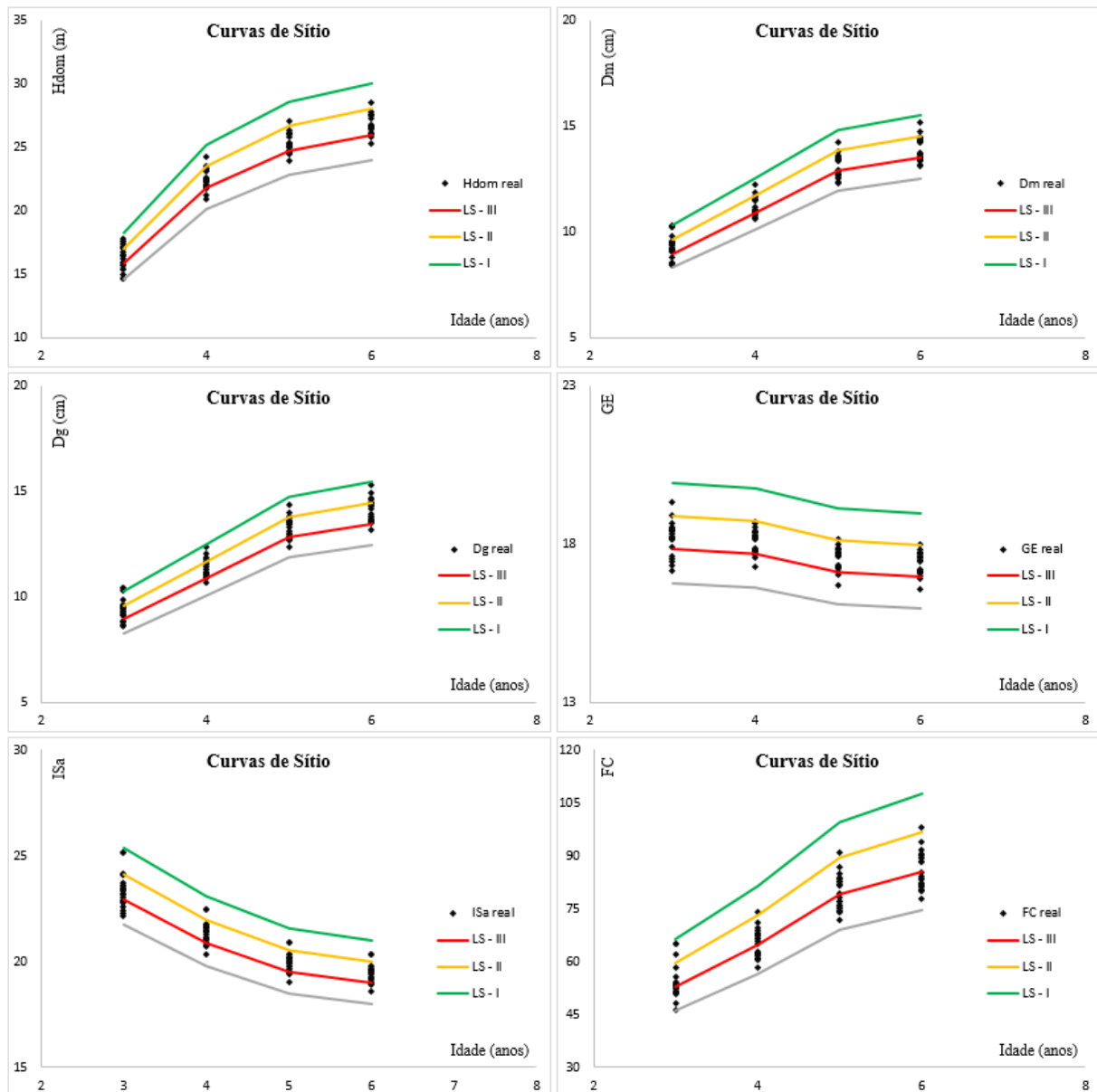


Figura 10. Curvas limite das classes de sítio para o povoamento em função das variáveis estudadas. LS – III = limite superior da classe III; LS-II = limite superior da classe II; LS-I = limite superior da classe I.

A idade-índice utilizada na geração das curvas de sítio foi de 6 anos com a amplitude das curvas variando para cada variável estudada, estando os valores – $H_{dom} = 2$ m; $D_m = 1$ cm; $D_g = 1$ cm; $GE = 1$; $IS = 1$; $FC = 11$ – de acordo com o erro absoluto da estimativa encontrado no ajuste dos modelos de sítio e buscando a construção de três classes de sítio.

Visualmente é possível perceber que a forma das curvas são semelhantes para as três classes de sítio em todos os gráficos plotados, sendo que estas não se cruzam no período de tempo observado, bem como não apresentam nenhum indício ou comportamento de um cruzamento futuro. Este formato de gráfico indica um crescimento constante para todos os sítios, característica fundamental das curvas de sítio anamórficas.

O método da curva guia é um dos principais métodos utilizados por manejadores florestais para a construção de curvas anamórficas, estas com predomínio de uso no Brasil (SCAVINSKI, 2014; BINOTI, 2012).

Em seu trabalho com a mesma população florestal, Miguel (2009) também se deparou com a construção de curvas anamórficas após ajustar o modelo sigmoidal de Chapman-Richards para a classificação de sítios utilizando H_{dom} como variável dependente, justificando a adequabilidade das curvas geradas no presente trabalho.

Apesar de amplamente usada, Scavinski (2014) alerta para possíveis problemas de precisão das curvas anamórficas em representar o crescimento de um povoamento, uma vez que assumem que os indivíduos apresentam uma mesma taxa de crescimento ao longo de um ciclo, embora seja de conhecimento geral que há variação no crescimento entre espécies, indivíduos e até mesmo uma variação no crescimento individual de uma árvore ao longo do seu ciclo de vida .

5.4 Prognose

Os ajustes e estatísticas de precisão para o modelo de Clutter em função de cada variável estudada são apresentado na tabela 14.

Ao utilizar os índices de sítios gerados para cada uma das 6 variáveis no modelo de projeção de volume, é notável a similaridade dos valores de precisão entre eles. Todos as variáveis apresentam valores aceitáveis para erro de estimativa, bem como um alto grau de determinação, sendo o volume predito bem explicado pelas variáveis independentes. Por este critério, o uso de qualquer uma destas opções para classificação de sítio e prognose é válido.

Tabela 14. Coeficientes do modelo de Clutter ajustado com suas estatísticas de precisão para a prognose do volume em função das variáveis estudadas.

Varável estudada	Clutter ajustado	Syx (m ³)	Syx%	R ² ajustado
Altura Dominante	$\text{LnV}_2 = 3,158 + 1,465 \cdot \text{IS}^{-1} + (-2,426) \cdot \text{Id}_2^{-1} + 0,853 \cdot \left(\frac{\text{Id}_1}{\text{Id}_2}\right) \cdot \text{LnG}_1 + 3,867 \cdot \left(1 - \frac{\text{Id}_1}{\text{Id}_2}\right) + (-0,186) \cdot \left[\left(1 - \frac{\text{Id}_1}{\text{Id}_2}\right) \cdot \text{IS}\right]$	9,43	4,52%	0,95
Média dos Diâmetros	$\text{LnV}_2 = 4,738 + (-7,234) \cdot \text{IS}^{-1} + (-3,682) \cdot \text{Id}_2^{-1} + 0,606 \cdot \left(\frac{\text{Id}_1}{\text{Id}_2}\right) \cdot \text{LnG}_1 + 1,299 \cdot \left(1 - \frac{\text{Id}_1}{\text{Id}_2}\right) + 0,0851 \cdot \left[\left(1 - \frac{\text{Id}_1}{\text{Id}_2}\right) \cdot \text{IS}\right]$	7,96	3,81%	0,97
Diâmetro Médio Quadrático	$\text{LnV}_2 = 3,590 + (-3,689) \cdot \text{IS}^{-1} + (-2,562) \cdot \text{Id}_2^{-1} + 0,826 \cdot \left(\frac{\text{Id}_1}{\text{Id}_2}\right) \cdot \text{LnG}_1 + 2,246 \cdot \left(1 - \frac{\text{Id}_1}{\text{Id}_2}\right) + 0,0759 \cdot \left[\left(1 - \frac{\text{Id}_1}{\text{Id}_2}\right) \cdot \text{IS}\right]$	8,85	4,24%	0,96
Grau de Esbeltez	$\text{LnV}_2 = 3,009 + 7,446 \cdot \text{IS}^{-1} + (-2,709) \cdot \text{Id}_2^{-1} + 0,797 \cdot \left(\frac{\text{Id}_1}{\text{Id}_2}\right) \cdot \text{LnG}_1 + 5,494 \cdot \left(1 - \frac{\text{Id}_1}{\text{Id}_2}\right) + (-0,133) \cdot \left[\left(1 - \frac{\text{Id}_1}{\text{Id}_2}\right) \cdot \text{IS}\right]$	8,85	4,24%	0,96
Índice de Saliência	$\text{LnV}_2 = 3,150 + 12,697 \cdot \text{IS}^{-1} + (-3,175) \cdot \text{Id}_2^{-1} + 0,706 \cdot \left(\frac{\text{Id}_1}{\text{Id}_2}\right) \cdot \text{LnG}_1 + 3,769 \cdot \left(1 - \frac{\text{Id}_1}{\text{Id}_2}\right) + (-0,0480) \cdot \left[\left(1 - \frac{\text{Id}_1}{\text{Id}_2}\right) \cdot \text{IS}\right]$	8,92	4,27%	0,96
Formal de Copa	$\text{LnV}_2 = 4,521 + (-23,588) \cdot \text{IS}^{-1} + (-3,743) \cdot \text{Id}_2^{-1} + 0,596 \cdot \left(\frac{\text{Id}_1}{\text{Id}_2}\right) \cdot \text{LnG}_1 + 1,534 \cdot \left(1 - \frac{\text{Id}_1}{\text{Id}_2}\right) + 0,0104 \cdot \left[\left(1 - \frac{\text{Id}_1}{\text{Id}_2}\right) \cdot \text{IS}\right]$	7,94	3,80%	0,97

LnV₂ = logaritmo natural do volume predito; IS = índice de sítio; Id₁ = idade 1; Id₂ = idade 2; LnG₁ = logaritmo natural área basal no ano 1; Syx = Erro absoluto da estimativa; Syx% = erro percentual da estimativa.

Leite *et al.* (2011) avaliaram o uso de diâmetro dominante como variável alternativa à altura dominante, comparando os resultados de projeção de volume entre as duas medições. Os autores também verificaram eficiência semelhante para as duas alternativas, indicando também que não houve nenhum sinal de superioridade a favor do uso de nenhuma das duas variáveis.

Apesar de muito próximos, duas variáveis se destacam com resultados ligeiramente superiores aos demais: formal de copa (FC) e média dos diâmetros (Dm).

Em posse dos modelos ajustados, foi realizada a prognose nas parcelas de validação, escolhidas segundo o descrito no item 4.8, da qual os resultados estratificados por sítio florestal estão presentes na tabela 15. A partir destes mesmos dados compilados, foram gerada as análises de diferença agregada (Da%), Erro médio absoluto (Ei) e ANOVA fatorial para validar a adequação das variáveis testadas.

Tabela 15. Valores de projeção volumétrica para as parcelas de validação do sítio 1 nos anos amostrais em função das variáveis estudadas.

Variável Estudada	Parcela	Idade (anos)	Volume (m ³) - Sítio 1	Volume (m ³) - Sítio 2	Volume (m ³) - Sítio 3
Volume	1	3	89,21	83,07	78,16
		4	157,76	138,24	121,41
		5	229,65	197,88	178,70
		6	271,58	234,01	211,33
	2	3	79,24	85,00	66,71
		4	159,42	142,28	126,40
		5	234,63	209,73	186,11
		6	277,47	248,02	220,09
Altura Domiante	1	3	83,70	80,39	76,99
		4	146,91	142,00	137,46
		5	205,45	192,50	177,71
		6	263,84	244,43	228,57
	2	3	77,47	81,18	73,60
		4	138,11	143,04	132,90
		5	204,05	193,69	183,06
		6	263,97	250,02	235,74
Média dos Diâmetros	1	3	84,38	78,91	78,69
		4	148,14	140,07	140,59
		5	207,21	190,53	183,65
		6	265,18	241,28	235,27
	2	3	81,53	82,38	73,12
		4	145,04	145,50	132,28
		5	212,76	197,83	182,42
		6	274,02	254,22	233,86

Diâmetro Médio Quadrático	1	3	83,82	79,06	77,25
		4	146,65	140,05	137,95
		5	205,21	189,69	178,19
		6	263,71	240,80	229,26
	2	3	79,14	81,50	72,32
		4	140,69	143,60	130,99
		5	208,10	194,39	180,29
		6	269,41	251,00	232,16
Grau de Esbeltez	1	3	84,69	80,46	76,96
		4	145,53	142,30	137,62
		5	204,37	192,67	177,45
		6	263,39	244,72	228,39
	2	3	78,44	81,27	72,65
		4	137,40	143,37	133,96
		5	204,06	193,90	183,68
		6	264,87	250,49	236,11
Formal de Copa	1	3	84,55	79,15	78,81
		4	148,61	140,33	140,97
		5	207,83	190,88	184,00
		6	265,99	241,79	235,72
	2	3	81,34	82,53	73,29
		4	145,23	145,94	132,46
		5	212,97	198,34	182,69
		6	274,24	254,89	234,29
Índice de Saliência	1	3	85,61	80,40	77,02
		4	147,03	142,13	137,62
		5	206,52	192,69	177,99
		6	265,93	244,62	228,86
	2	3	79,51	81,18	71,97
		4	139,10	143,16	132,62
		5	206,21	193,87	181,94
		6	267,37	250,18	233,63

5.5 Avaliação das Variáveis

Todas as variáveis apresentaram valores positivos para diferença agregada (Tabela 16), o que demonstra tendência de subestimar os valores de volume, porém em pequena intensidade, uma vez que os percentuais de Da% foram baixos, destaque para as variáveis índice de saliência e média dos diâmetros que apresentaram os melhores resultados.

Comportamento semelhante é observado quando analisados os resultados para erro médio absoluto (Tabela 16). Assim como Da%, os valores de Ei para todas as variáveis são

positivos, ratificando a averiguação anterior da tendência de subestimativa para o volume. Mais uma vez a média dos diâmetros obteve destaque junto do índice de saliência, respectivamente, apresentando os melhores valores para E_i , abaixo de 1 m³/ha. Esse resultado, junto ao apresentado no ajuste de Clutter, evidencia uma possível vantagem no uso de FC, Dm e ISa na classificação e projeção da qualidade produtiva de sítios florestais. Variáveis que apresentam valores de E_i próximo a zero demonstram maior capacidade de realizar a estimativa desejada com acurácia (Miguel *et al.*, 2015).

Os valores baixos apresentados nas duas análises indicam boa acurácia para todas as variáveis propostas, ainda que algumas se sobressaíam, e, por consequência, uma boa adequabilidade destas para a prognose volumétrica,

Tabela 16. Valores encontrados para diferença agregada e erro médio absoluto na projeção volumétrica utilizando as variáveis estudadas.

Variável	Da%	Ei (m ³ /ha)
Hdom	1,72%	2,8885
Dm	0,43%	0,7184
Dg	1,76%	2,9527
GE	1,67%	2,8068
ISa	0,23%	0,3857
FC	1,46%	2,4541

Da% = diferença agregada percentual; E_i = erro médio absoluto; Hdom = altura dominante; Dm = média dos diâmetros; Dg = diâmetro médio quadrático; GE = grau de esbeltez; ISa = índice de saliência; FC = formal de copa.

A análise de variância (Tabela 17) mostrou que não há diferença significativa entre as variáveis estudadas (tratamentos), bem como não há efeito de interação, isto é, um tratamento não influencia no resultado de outro tratamento.

O fato de não haver diferença estatisticamente significante entre as variáveis demonstra que estas são capazes de explicar e prever a produção em volume do povoamento à um nível de precisão ótimo, uma vez que os valores de volume observado também foram incluídos na ANOVA como um tratamento testemunha. Isso corrobora o demonstrado pelos outros testes de validação.

Além disso, não haver diferença entre as variáveis propostas como alternativa para a classificação de sítio e a altura dominante responde à um dos objetivos específicos propostos para este estudo de encontrar uma variável alternativa para Hdom.

Tabela 17. ANOVA em ajuste fatorial.

Fonte de Variação	SQ	GI	QM	
Fator A (Índices)	248.23	6.00	41.37	Não significativo
Fator B (Sítios)	13168.83	2.00	6584.41	Não significativo
Interação	1444.18	12.00	120.35	Não significativo
Tratamentos	14861.24	20.00	743.06	Não significativo
Resíduo	669059.36	147.00	4551.42	
Total	683920.59	167.00	4095.33	

SQ = soma quadrática; GI = graus de liberdade; QM = quadrado médio

6. CONCLUSÃO

Os índices morfométricos formal de copa, índice de saliência e índice de esbeltez apresentaram estatísticas de precisão satisfatórias para a classificação das unidades produtivas, além das variáveis dendrométricas média dos diâmetros, diâmetro médio quadrático e altura dominante.

A altura dominante, mesmo não apresentando correlação significativa com o volume, quando utilizado para classificar as unidades produtivas, por conseguinte no modelo de projeção de Clutter, mostrou-se eficaz. Este resultado abre um leque para novos trabalhos, com intuito de avaliar a eficiência da correlação em descartar ou não possíveis variáveis explicativas em modelos de regressão.

Todas as variáveis utilizadas para classificar as unidades produtivas apresentaram estatísticas de precisão satisfatórias, quando utilizadas no ajuste do modelo de Clutter, com ligeira vantagem para o formal de copa e a média dos diâmetros.

A análise via diferença agregada e erro médio absoluto constatou um ligeiro viés de subestimação nos resultados de prognose para todas as variáveis estudadas, todavia este viés não comprometem o uso do modelo.

Apesar do ligeiro destaque para o formal de copa, a média dos diâmetros e o índice de saliência na precisão da estimativa de volume futuro, podemos considerar que todos os três índices morfométricos e as demais variáveis dendrométricas podem ser utilizadas para classificação de unidades produtivas, bem como na prognose da produção, uma vez que não apresentaram diferença significativa com o volume real, via análise de variância.

Por fim, recomenda-se a realização de novos estudos abordando este tema, uma vez que até a presente data não foi encontrado nenhum trabalho que utilize índices morfométricos para a classificação da qualidade produtiva de povoamentos equiâneos, e que existe claros

indicativos que novas variáveis podem substituir a altura dominante, melhorando assim a confiabilidade dos estimadores de produção.

7. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- ASSMANN, E. **The principles of forest yield study**. Oxford: Pergamon Press, 506 p. 1970;
- AZEVEDO, G. B. de; SOUSA, G. T. de O.; BARRETO, P. A. B.; CONCEIÇÃO JUNIOR, V. Estimativas volumétricas em povoamentos de eucalipto sob regime de alto fuste e talhadia no sudoeste da Bahia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 309-318, out./dez. 2011;
- BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. da S.; LEITE, H. G. Aplicação da função hiperbólica na construção de curvas de índice de local. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 4, p. 741-746, jul./ago. 2012;
- CALDEIRA, M. V. W.; TONINI, H.; HOPPE, J. M.; WATZLAWICK, L. F.; SELLE, G. L. Definição de sítios em povoamentos de *Pinus elliottii* Engelm na região de Encruzilhada do Sul, RS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 1-13, 1996;
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: Perguntas e resposta**. 4 ed. Viçosa: Editora UFV, 2013, 605 p;
- COSENZA, D. N.; LEITE, H. G.; MARCATTI, G. E.; BINOTI, D. H. B.; ALCÂNTARA, A. E. M. de; RODE, R. Classificação da capacidade produtiva de sítios florestais utilizando máquina de vetor de suporte e rede neural artificial. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 108, p. 955-963, dez. 2015;
- CURTIS, R. O.; MARSHALL, D. D. Why quadratic mean diameter? **Western Journal of Applied Forestry**, Bethesda, v. 15, n. 3, p. 137-139, jul. 2000 (Nota técnica);
- DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. New York: John Willey & Sons, 1981, 407 p;
- DURLO, M. A.; DENARDI, L. Morfometria de *Cabralea canjerana*, em mata secundária nativa do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 55-66, 1998;
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3 ed. Brasília, 2013. 353 p;
- ENCINAS, J. I.; SILVA, G. F. da; TICCHETTI, I. **Variáveis dendrométricas**. Brasília: UnB, 2002. 102 p. (Comunicações Técnicas Florestais, v. 4, n. 1);
- EPRON, D.; NOUVELLON, Y.; MARESCHAL, L.; MOREIRA, R. M. E.; KOUTIKA, L. S.; GENESTE, B.; DELGADO-ROJAS, J. S.; LACLAU, J. P.; SOLA, G.; GONÇALVES, J. L. D. M.; BOUILLET, J. P. Partitioning of net primary production in *Eucalyptus* and *Acacia* stands and in mixed-species plantations: Two case-studies in contrasting tropical environments. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301, p. 102-111, ago. 2013;

- FERRAZ FILHO, A. C.; SCOLFORO, J. R. S.; FERREIRA, M. Z.; MAESTRI, R.; ASSIS, A. L. de; OLIVEIRA, A. D. de; MELLO, J. M. de. Modelo de projeção em altura dominante com adição de variáveis ambientais. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 3, p. 427-433, jul./set. 2011;
- IBÁ – Industria Brasileira de Árvores. **IBÁ 2014**, Brasília, 2014. Disponível em: <http://www.iba.org/images/shared/iba_2014_pt.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2016;
- IBÁ – Industria Brasileira de Árvores. **Cenários IBÁ: Estatísticas da indústria brasileira de árvores**, Brasília, v. 20, jan. 2016. Disponível em: <http://iba.org/images/shared/Cenarios_Janeiro.pdf>. Acesso em: 04 mar. 2016;
- JONES, J. R. **Review and comparison of site evaluation methods**. USDA Forest Service Research Paper RM-51, Fort Collins, Colorado, EUA, 1969, 27 p;
- KILLIAN, W. *et al.* **Site classification and mapping**. In: IUFRO Symposium on Site and Productivity of Fast Growing Plantations 1984, Pretoria, Pietermaritzburg. [**Proceedings...**] Pretoria: South African Forests Research Institute, p. 51-162, 1984;
- KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes. 1928. Wall-map 150cmx200cm;
- LEITE, H. G.; CASTRO, R. V. O.; SILVA, A.; ARAUJO JÚNIOR, C. A.; BINOTI, D. H. B.; CASTRO, A. F. N. M.; BINOTI, M. L. M. S. Classificação da capacidade produtiva de povoamentos de eucalipto utilizando diâmetro dominante. **Silva Lusitana**, Lisboa, v. 19, n. 2, p. 181-195, 2011;
- MACHADO, S. do A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. 2 ed. Guarapuava: Editora UNICENTRO, 2006, 316 p;
- MACHADO, S. do A.; FIGURA, M. A.; SILVA, L. C. R. da; NASCIMENTO, R. G. M.; QUIRINO, S. M. dos S.; TÊO, S. J. Dinâmica de crescimento de plantios jovens de *Araucaria angustifolia* e *Pinus taeda*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 62, p. 165-170 mai./jul. 2010;
- MARTINS, E. F. P.; **Curvas de índice de sítio para Leucena [*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit] no agreste de Pernambuco**. 2006. 94 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2006;
- MIGUEL, E. P. **Avaliação biométrica e prognose da produção de *Eucalyptus urophylla* (S.T. Blake) na região norte do estado de Goiás**. 2009. 161 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009;
- MIGUEL, E. P.; REZENDE, A. V.; LEAL, F. A.; MATRICARDI, E. A. T.; VALE, A. T. do; PEREIRA, R. S. Redes neurais artificiais para a modelagem do volume de madeira e biomassa do cerradão com dados de satélite. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 9, p. 829-839, set. 2015;
- ORELLANA, E.; KOEHLER, A. B. Relações morfométricas de *Ocotea odorífera* (Vell.) Rhower. **Rev. Acad. Ciênc. Agrár. Ambient.**, Curitiba, v. 6, n. 2, p. 229-237, abr./jun. 2008;

- PADOIN, V.; FINGER, C. A. G. Relações entre as dimensões da copa e a altura das árvores dominantes em povoamentos de *Pinus taeda* L. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 95-105, jan./mar. 2010;
- PÉREZ-CRUZADO, C.; MERINO, A.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R.; A management tool for estimating bioenergy production and carbon sequestration in *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens* grown as short rotation woody crops in north-west Spain. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 35, p. 2839–2851, jul. 2011;
- 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, abr./jun. 2015;
- ROMAN, M.; BRESSAN, D. A.; DURLO, M. A. Variáveis morfométricas e relações interdimensionais para *Cordia trichotoma* (Vell.) Arráb. ex Steud. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 4, p. 473-480, out./dez. 2009;
- SALES, F. das C. V.; SILVA, J. A. A. da; FERREIRA, R. L. C.; GADELHA, F. H. de L. Ajuste de modelos volumétricos para o clone *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* cultivados no agreste de Pernambuco. **Floresta**, Curitiba, v. 45, n. 4, p. 663-670, out./dez. 2015;
- SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A.; CORTE, A. P. D.; FERNANDES, A. C.; BECKERT, S. M.; SIMON, A. A. Equações para estimativa do diâmetro de copa para Acácia-negra. **Floresta e Ambiente**. Seropédica, v. 21, n. 2, p. 192-205, abr./jun. 2014;
- SANTOS, A. T. dos. **Análise do crescimento e simulação de manejo de um plantio de *Ocotea porosa***. 2012. 93 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012;
- SANTOS, R. C. dos. **Curvas de crescimento em altura e índice de sítio de povoamentos clonais de *Eucalyptus* spp. na Chapada do Araripe, Pernambuco**. 2012. 83 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2012;
- SCAVINSKI, V. **Projeção da produção utilizando curvas de sítio anamórficas e polimórficas para plantios de *Eucalyptus grandis* W. Hill. Ex. Maiden**. 2014. 61 p. Dissertação (Mestrado em Manejo Florestal) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, 2014;
- SCHÖNAU, R. Problems in using vegetation or soil classification in determining site quality. **South African Forestry Journal**, Pretoria, n. 141, p. 13-18, 1987;
- SCOLFORO, J. R.; **Biometria florestal: modelos de crescimento e produção florestal**. Lavras: FAEPE-UFLA, 2006. 393 p.;
- SCOLFORO, J. R. S.; MACHADO, S. A. Curvas de índice de sítio para plantações de *Pinus elliottii* nos estados do Paraná e Santa Catarina. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 17, p. 140-158, 1988;
- SCOLFORO, J. R. S.; MAESTRI, R.; FERRAZ FILHO, A. C.; MELLO, J. M. de; OLIVEIRA, A. D. de; ASSIS, A. L. de. Dominant height model for site classification of *Eucalyptus grandis* incorporating climatic variables. **International Journal of Forestry Research**, v. 2013, Article ID 139236, 7 p., 2013;

- SOCIETY OF AMERICAN FORESTERS. **Forest terminology: A glossary of technical terms used in forestry**. 3 ed. Washington, D.C., EUA, 1958, 97 p.;
- SORATO, A. M. da C. **Ajuste de modelo não linear ao crescimento de duas cultivares de feijoeiro em diferentes densidades de semeadura**. 2012, 84 p. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agropecuária) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012;
- SOUZA, J. T. de; TREVISAN, R.; DENARDI, L.; STANGERLIN, D. M.; VIVIAN, M. A.; HASELEIN, C. R.; SANTINI, E. J. Qualidade da madeira serrada proveniente de árvores dominantes e médias de *Eucalyptus grandis* submetidas à secagem. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 1, p. 167-174, jan./mar. 2012;
- TONINI, H.; ARCO-VERDE, M. F. Morfologia da copa para avaliar o espaço vital de quatro espécies nativas da Amazônia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 7, p. 633-638, jul. 2005;
- TONINI, H.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. Curvas de índice de sítio para povoamentos clonais de *Eucalyptus saligna* Smith para a depressão central e serra do sudeste, Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 1, p. 27-43, 2006;
- VÉGA, C.; ST-ONGE, B. Mapping site index and age by linking a time series of canopy height models with growth curves. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 257, p. 951-959, 2009;
- WATT, M. S.; DASH, J. P.; BHANDARI, S.; WATT, P. Comparing parametric and non-parametric methods of predicting site index for radiata pine using combinations of data derived from environmental surfaces, satellite imagery and airborne laser scanning. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 357, p. 1-9, 2015;
- WEBER, V. P.; FINGER, C. A. G.; FLEIG, F. D.; SOUZA, C. A. M. de; MUNARETO, F. F.; SILVA, L. T. de M. da. Diretrizes para desbaste de *Pinus taeda* L. em função da altura dominante. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 1, p. 193-201, jan./mar. 2013;
- WINK, C.; MONTEIRO, J. S.; REINERT, D. J.; LIBERALESSO, E. Parâmetros da copa e sua relação com o diâmetro e altura das árvores de eucalipto em diferentes idades. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 93, p. 57-67, mar. 2012;
- ZAMIN, N. T. **Modelagem da produção mensal de indivíduos de *Araucaria angustifolia* e *Pinus taeda* com inclusão de variáveis meteorológicas**. 2013. 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.