



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

ANA LÚCIA SALVADOR ORMOND BERGAMINI LIMA

**INFLUÊNCIA DA IDADE-ÍNDICE NAS ESTIMATIVAS DE ÍNDICES DE SÍTIO E
DE VOLUMES EM POVOAMENTO DE EUCALIPTO**

Prof. Dr. MARCO ANTONIO MONTE
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
SETEMBRO – 2022



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

ANA LÚCIA SALVADOR ORMOND BERGAMINI LIMA

**INFLUÊNCIA DA IDADE-ÍNDICE NAS ESTIMATIVAS DE ÍNDICES DE SÍTIO E
DE VOLUMES EM POVOAMENTO DE EUCALIPTO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Florestal, como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Florestal, Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Prof. Dr. MARCO ANTONIO MONTE
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
SETEMBRO – 2022

**INFLUÊNCIA DA IDADE-ÍNDICE NAS ESTIMATIVAS DE ÍNDICES DE SÍTIO E
DE VOLUMES EM POVOAMENTO DE EUCALIPTO**

ANA LÚCIA SALVADOR ORMOND BERGAMINI LIMA

APROVADA EM: 15/09/2022

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. MARCO ANTONIO MONTE – UFRRJ
Orientador

Prof. Dr. EMANUEL JOSÉ GOMES DE ARAÚJO – UFRRJ
Membro

JULIA MARTINS DIAS DE OLIVEIRA – UFRRJ
Membro

Dedico este trabalho a todas as pessoas que não desistem e dão o seu melhor. Em especial cientistas do Brasil e manejadores florestais.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço à minha mãe por todo amor, amizade, conselhos, amor, torcida, afeto e apoio nessa jornada, que parece eterna. Obrigada por cada comida que me deu pra trazer pra Seropédica. Os amigos agradecem também. Sem minha mãe nada disso seria possível. Mãe, finalmente, estou -quase- formando!

À minha irmã e familiares que amo muito e também acompanham com carinho essa trajetória, em especial minha madrinha, tios, primos e primos/sobrinhos.

Ao meu orientador e banca, pelos ensinamentos, reuniões diversas e, em especial, pela confiança depositada. Aos membros do LAMFLOR por todo aprendizado, parceria e estímulo. Agradeço demais pelos campos na FLONA, por todas as risadas, as inúmeras dúvidas tiradas no laboratório e no bandeirão, e por cada café e cada lição de vida, profunda ou banal.

À empresa, que permitiu o uso dos dados para esta pesquisa.

Aos amigos que são, sem dúvida, a família que escolhemos. Muito obrigada a cada uma dessas pessoas tão queridas. Cada parceria, aventura, conselho, material emprestado, cada salve, noite de jogos de baralho, dias e noites de estudos, cada caminhada pela Rural e cada festinha ou encontro. Sou eternamente grata pelos que me estenderam a mão e que estiveram comigo em momentos difíceis. Agradeço também por partilharmos os momentos incríveis.

Amigos do curso, com quem dividi aulas e troquei mil ideias de projetos. Ao pessoal da minha turma e aos meus *bixos* que são maravilhosos.

Amigos do M4 por toda cumplicidade e acolhimento, loucuras e desafios vividos. A galera do F1, onde sempre foi minha terceira casa.

Aos membros e amigos de CAEF e do PET com quem dividi sonhos e experiências. Aos amigos de república, de CAUR, da vida ruralina. Agradeço às experiências no viveiro, EMBRAPA, nos laboratórios onde passei, no NAI, congressos e semanas acadêmicas.

Aos professores, técnicos e todos profissionais do Instituto de Florestas que se dedicam para um curso melhor e muito impacta na vida das pessoas que por lá passam.

Por fim, àquela que proporcionou todas essas oportunidades, à Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, pelo privilégio de aqui estudar e viver! E por extensão, à sociedade brasileira pelo investimento na educação de pessoas como eu.

RESUMO

O Brasil tem papel importante no mercado florestal mundial, sendo líder no comércio de produtos feitos a partir do eucalipto, como celulose e carvão. Para um manejo adequado desses plantios com finalidade de conhecer sua produção volumétrica, ferramentas de modelagem da capacidade produtiva e do crescimento e produção são muito usadas. Na avaliação da capacidade produtiva deve-se definir a idade-índice para as estimativas de índice de sítio, que é escolhida de forma arbitrária, próxima à idade de rotação. Porém poucos estudos abordam sua influência nas estimativas de sítio. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da idade-índice nas estimativas de sítio e na prognose de área basal e de volume. Para este trabalho foram analisados dados do inventário florestal contínuo de um povoamento de eucalipto com 2.799 hectares, estabelecido no espaçamento inicial foi de 3,0 x 3,0 m. Os dados foram obtidos em 475 unidades amostrais com área média de 545 m². As árvores foram mensuradas de 2013 a 2020 em idades variando de 21,2 a 91,2 meses. Para o estudo da capacidade produtiva foi considerado o método da curva-guia e ajustado o modelo logístico; as idades-índices utilizadas foram: 24, 36, 48, 60, 72, 84 e 96 meses. As estimativas de área basal e volume foram obtidas por meio do ajuste do modelo de Clutter e a qualidade do ajuste avaliada por meio do coeficiente de determinação ajustado, coeficiente de variação (%), Bias (%), raiz quadrada do erro médio; gráficos de dispersão de resíduos normalizados e gráficos de valores de volumes observados *versus* estimados, para todas as idades-índices. As idades-índices (I_i) influenciaram nas estimativas de índice de sítio (S) e, conseqüentemente, nas curvas de sítio, pois os valores mínimos e máximos dos sítios variam em função da idade-índice. Somente os coeficientes do modelo de Clutter, associados ao S apresentaram alteração, reduzindo-se à medida que se aumentou os valores de I_i ; mas esta redução não influenciou nas estimativas de área basal e de volume, que apresentaram qualidade de ajuste satisfatória. A idade-índice, portanto, influencia nas estimativas do índice de sítio, mas não afeta as estimativas de área basal e de volume, quando se utiliza o método da curva-guia. Por isso, para fins de efeitos comparativos recomenda- definir a idade-índice próxima à idade técnica de corte.

Palavras-chave: capacidade produtiva, prognose, Clutter.

ABSTRACT

Brazil plays an important role in the world forest market, being the leader in the trade of products made from eucalyptus, such as cellulose and charcoal. For adequate management of these plantations to know their volumetric production, tools for modelling production capacity and growth and production are widely used. In evaluating productive capacity, the index-age must be defined for the site index estimates, which is chosen arbitrarily, close to the rotation age. However, few studies address its influence on-site estimates. Thus, this work aimed to evaluate the effect of index age on estimating site, basal area, and volume. For this work, data from the continuous forest inventory of a eucalyptus stand with 2,799 hectares were analyzed, established in the initial spacing of 3.0 x 3.0 m. Data were obtained from 475 sampling units with an average area of 545 m². The trees were measured from 2013 to 2020 at ages ranging from 21.2 to 91.2 months. For the study of productive capacity, the guide-curve method was considered, and the logistic model was adjusted; the index ages used were: 24, 36, 48, 60, 72, 84 and 96 months. Basal area and volume were obtained via Clutter model; the quality of the adjustment was evaluated through the adjusted coefficient of determination, coefficient of variation (%), Bias (%), square root of the mean error; scatter plots of normalized residuals and plots of observed versus estimated volume values for all index ages. The index ages (I_i) influenced the estimates of the site index (S) and, consequently, the site curves since the minimum and maximum values of the sites vary as a function of the index age. Only the coefficients of the Clutter model associated with S showed alterations, decreasing as the values of I_i increased. Still, the reduction did not influence the basal area and volume estimates, which showed a satisfactory fit quality. The index age, therefore, influences the site index estimates but does not affect the basal area and volume estimates when using the guide curve method. Thus, for purposes of comparative effects, it is recommended to define I_i close to the age of cut.

Keywords: productive capacity, prognosis, Clutter.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	1
2.1. Capacidade produtiva	1
2.2. Crescimento e produção	2
3. MATERIAL E MÉTODOS	3
3.1. Área de estudo e fonte de dados	3
3.2. Capacidade produtiva e prognose	3
3.3. Avaliação do ajuste	4
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	5
4.1. Influência no índice de sítio	5
4.2. Influência na produção em área basal e volume	7
5. CONCLUSÃO	9
6. REPEFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	9
APÊNDICE: TABELAS	13

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Índice de sítio mínimo, médio e máximo para idades-índices de 24, 36, 48, 60, 72, 84 e 96 meses, em povoamento de eucalipto.....	5
Tabela 2. Valores dos coeficientes das equações geradas pelo ajuste do modelo de Clutter na prognose de área basal e volume em povoamento de eucalipto.	7
Tabela 3. Critérios estatísticos calculados para avaliação do ajuste do modelo de Clutter na estimativa da área basal (G) e volume (V) em povoamento de eucalipto.....	8
Tabela 4. Valores de coeficientes (todos significativos a 0,001%) e critérios estatísticos das equações de volume dos estratos geradas pelo ajuste do modelo de Schumacher e Hall.....	13
Tabela 5. Valores de coeficientes (todos significativos a 0,001%) e critérios estatísticos das equações genéricas de volume geradas pelo ajuste do modelo de Schumacher e Hall.....	14

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Gráficos de feixe de curvas de índice de sítio para 5 classes de capacidade produtiva de um povoamento de eucalipto, para idades-índices de 24, 36, 48, 60, 72, 84 e 96 meses.....6
- Figura 2. Gráfico de decréscimo dos valores dos coeficientes do modelo de Clutter associados à variável sítio conforme variação da idade-índice de um povoamento de eucalipto.....7
- Figura 3. Gráficos de dispersão de resíduos normalizados das estimativas de volume pelo modelo de Clutter de um povoamento de eucalipto, para idade-índice de 72 meses.....8
- Figura 4. Gráficos de dispersão dos valores observados e estimados do volume de um povoamento de eucalipto, para idade-índice de 72 meses.....9

1. INTRODUÇÃO

O eucalipto é um grupo de espécies nativas da Austrália, Nova Guiné e Indonésia (JUNIOR, 2014) que foi introduzida no Brasil no início dos anos 1900, com objetivo de produção de lenha, postes e dormentes para linha férrea, tendo maior uso como matéria prima para produção de papel e celulose a partir dos anos 50 (DOSSA et al., 2002). Atualmente, o Brasil tem grande importância no setor florestal mundial, com destaque para o comércio de celulose e carvão vegetal. Ambos são abastecidos, principalmente, por madeira de povoamentos de eucalipto que, em 2020, totalizou 7,47 milhões de hectares plantados no país, com receita R\$ 116,6 bilhões (IBÁ, 2021).

Para um bom manejo desses plantios e melhor tomada de decisão é preciso entender os processos de crescimento e produção, com foco na predição florestal (COSENZA et al., 2015). Nas propriedades com plantios florestais, o manejo florestal é fundamental para aplicação de métodos e princípios técnicos para monitoramento e operações (SILVA, 1996).

Para esta finalidade, utiliza-se a modelagem, que permite estimar variáveis de interesse como o volume de madeira, que é utilizado no planejamento da colheita das árvores, estoque, logística, e cálculo de receita do empreendimento. Para isso, estimativas futuras de volume são, portanto, fundamentais. Um método muito usado é o ajuste do modelo de Clutter, que permite fazer a prognose da área basal e volume de um povoamento. (CLUTTER, 1963).

Para aplicação de modelos como o de Clutter, utiliza-se de variáveis como o índice de sítio, que expressa de forma numérica a capacidade produtiva de um local. A capacidade produtiva pode ser definida quantitativamente com base no índice de sítio e na idade-índice, sendo esta escolhida de forma arbitrária, geralmente definida próxima a idade técnica de corte (CAMPOS; LEITE, 2017).

Como a idade-índice é escolhida próxima à rotação, valores entre 5 a 7 anos são muito usados no Brasil para o eucalipto (SALLES et al., 2012; GONÇALVES et al., 2016; SILVA et al., 2020). Entretanto, as curvas de índice de sítio dependem da idade-índice usada, e esta influencia na precisão das estimativas de sítio, observando-se diferenças na forma das curvas de altura dominante em função da idade, sob diferentes idades-índices (SCOLFORO, 2006). Porém, há uma escassez de trabalhos que simulem aplicação de diversas idades-índices nos estudos de capacidade produtiva e seus efeitos nas estimativas de volume.

Com base nisso, as hipóteses testadas nesse estudo foram: a) a idade-índice influencia na estimativa dos índices de sítio; b) os valores de sítio irão influenciar nos coeficientes do modelo de Clutter; c) a estimativa da área basal e volume futuros serão influenciados pelas estimativas de sítio.

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da escolha da idade-índice na avaliação da capacidade produtiva e na prognose da produção florestal.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Capacidade produtiva

A capacidade produtiva refere-se ao potencial de produção de um povoamento florestal, geralmente de madeira, e pode ser qualitativa, em classes de alta, média e baixa capacidade produtiva ou quantitativa, estimando índices de sítio (OLIVEIRA et al., 2008).

Esse estudo pode ser feito por meio de métodos diretos ou indiretos. Os métodos indiretos fornecem resultado qualitativo e se baseiam em características edafoclimáticas, indicadores ecológicos, entre outros, enquanto que os métodos diretos fornecem valores quantitativos e utilizam dados de altura dominante e idade (CAMPOS; LEITE, 2017). Os modelos matemáticos que usam essa relação, do crescimento da altura dominante em função da

idade, têm sido muito aplicados pela praticidade, consistência e eficiência (SILVA et al., 2015; ZIECH et al., 2016; MURILO et al., 2017).

A altura dominante é uma variável escolhida pois possui alta correlação com a capacidade produtiva e, diferente do diâmetro e volume, não é influenciada pelo espaçamento de plantio, (SCOLFORO, 2006). A altura dominante se correlaciona ainda com o volume, podendo ser variável independente em equações hipsométricas usadas em conjunto com equações volumétricas (LEITE; ANDRADE, 2003). Índices de sítio definidos com base na altura dominante são, também, mais correlacionados produção volumétrica e área basal (LEITE et al., 2009).

Dentre os tipos de modelos que exploram a relação entre essas variáveis, destacam-se os não lineares, como o logístico, que são muito indicados para classificação do índice de sítio (DALOSTO; COLTURATO; PASQUALETTO, 2016; MELO et al., 2017). O índice de sítio pode ser definido como o valor da média das alturas das árvores dominantes e/ou codominantes de um local em uma idade-índice escolhida previamente e de maneira arbitrária, próxima a idade técnica de rotação (CAMPOS; LEITE, 2017).

Os valores de índice de sítio podem ser mapeados no povoamento e construídas curvas de índice de sítio, que servirão de comparativo para identificação das regiões com maior ou menor capacidade produtiva. Essas curvas podem ser divididas em duas famílias: as anamórficas, que possuem taxa de crescimento relativo à altura constante para todos os sítios, ou seja, têm proporcionalidade; e as polimórficas: em que a taxa de crescimento depende do sítio, assim, essas curvas apresentam diferentes inclinações e formatos (SCOLFORO, 2006).

Para geração dessas curvas existem diversos métodos. Alguns permitem a construção de curvas anamórficas, enquanto outros gera curvas polimórficas ou ambas, com destaque para o da equação das diferenças, o da predição de parâmetros e o da curva-guia, amplamente usado devido sua facilidade (CASTRO et al., 2016; DIAS et al., 2005a).

Este último método pode ser utilizado para gerar as curvas de índice de sítio anamórficas (MIGUEL et al., 2011). As curvas anamórficas, por terem taxas constantes, não expressam a realidade biológica do crescimento de diferentes sítios, uma vez que este é afetado por diversos fatores, inclusive pelas condições do local (SCAVINSKI, 2014).

2.2.Crescimento e produção

Estudos de crescimento e produção são igualmente importantes para o manejo florestal, pois nos povoamentos florestais, o crescimento das árvores é um processo de mudanças no seu tamanho e forma e reflete na produção de madeira, volume acumulado no tempo (CAMPOS; LEITE, 2017). Assim, este conhecimento se torna indispensável para a obtenção do volume total de maneira acurada.

O crescimento é influenciado por diversos fatores como espécie, procedência, tipo de manejo, condições ambientais, idade, densidade e capacidade produtiva, sendo essas três últimas as variáveis fundamentais nos modelos de crescimento e produção (SCOLFORO, 2006).

Nos modelos de crescimento e produção, os índices de sítio estimados para capacidade produtiva são variáveis independentes de diversos modelos (TONINI; SCHNEIDER; FINGER, 2006). Um muito utilizado é o de Clutter, que é um modelo a nível de povoamento, com densidade variável e que permite estimar a produção de madeira futura (SCOLFORO, 2006).

O modelo de Clutter é geralmente aplicado para prognose do volume e posterior obtenção da idade técnica de corte (ITC), como usado por SOARES et al. (2004). Os valores de ITC diminuem à medida que se aumentam o sítio, demonstrando estagnação do crescimento mais precocemente em locais de maior capacidade produtiva, como observado por Dias et al.

(2005b). Valores de idade-índice são, em geral, estimadas pela ITC obtida pelo cálculo da máxima produtividade média, como realizado por Castro et al. (2015).

No entanto, o contrário é pouco explorado. Poucos trabalhos avaliam a interferência da idade-índice no cálculo de volume.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de estudo e fonte de dados

Os dados para a realização desse estudo foram disponibilizados por uma empresa florestal, localizada em Minas Gerais, com clima Aw, tropical com inverno seco, pela classificação de Köppen (MARTINS et al., 2018). Por questão de confidencialidade algumas informações sobre a localização da empresa serão omitidas no presente estudo.

A área de estudo foi de 2.799 ha, correspondendo a 80 talhões de povoamentos de eucalipto, com regime de manejo de alto fuste, sob espaçamento inicial de plantio de 3,0 x 3,0 m. Os dados foram obtidos por meio de inventário florestal contínuo (IFC), em 475 unidades amostrais (UA), distribuídas em talhões, sendo considerado os talhões com duas ou mais UA. A área média das UAs foi de 545 m² (variando entre 462 a 714 m²) e foram medidas entre os anos de 2013 a 2020, com periodicidade irregular de medição em cada talhão. As idades de medição variaram de 21,6 a 91,2 meses.

Para cada UA foram medidos: circunferência a altura do peito (CAP – a 1,30 m do solo) de todos os indivíduos, com fita métrica e, posteriormente, convertida algebricamente para diâmetro a altura do peito (DAP = CAP/π); altura total das 10 primeiras árvores sadias; e altura das cinco árvores dominantes/codominantes. As alturas dos indivíduos foram mensuradas com clinômetro digital. Para seleção das árvores dominantes foram selecionados apenas indivíduos saudáveis, sem defeitos ou com ataques de pragas, de tronco retilíneo, sem bifurcação. E para cálculo da altura dominante foi adotado conceito de Assmann, sendo a média da altura das 100 árvores mais grossas por hectare (SCOLFORO, 2006).

O volume individual foi obtido a partir da cubagem rigorosa de 20 árvores, em média, por estrato, utilizando o método de Smalian. Os estratos representam a combinação de data de plantio e idade, a fim de obtenção de grupos homogêneos. Foram ajustadas 28 equações considerando o modelo de Schumacher e Hall (equação 1). Para os estratos sem dados de cubagem foram geradas equações genéricas, considerando os dados de outros talhões que apresentavam a mesma idade; 8 talhões tiveram, portanto, o uso de equações genéricas (Tabela 5 do apêndice).

$$\ln(V) = \beta_0 + \beta_1 \ln(DAP) + \beta_2 \ln(H) + \varepsilon \quad (1)$$

Em que: Ln = logaritmo neperiano, V = volume em m³, β₀ β₁ e β₂ = coeficientes do modelo, DAP = diâmetro a altura do peito em cm, H = altura em m e ε = erro da estimativa.

3.2. Capacidade produtiva e prognose

O estudo da capacidade produtiva foi realizado por meio do método da curva-guia utilizando o modelo logístico (equação 2) com 1.021 pares de altura dominante e idade. A escolha do modelo logístico ocorreu após uma análise prévia considerando, também, os modelos de Schumacher e o linear simples, sendo o que o modelo logístico apresentou resultado mais satisfatório.

$$Hd = \frac{\beta_0}{(1+\beta_1 e^{-\beta_2 I})} + \varepsilon \quad (2)$$

Em que: Hd = altura dominante em m, β_0 , β_1 e β_2 = coeficientes do modelo, I = idade em meses e ε = erro da estimativa.

Para cada idade-índice utilizada (24, 36, 48, 60, 72, 84 e 96 meses) foi estimada a altura dominante e o índice de sítio a partir da transformação algébrica do modelo logístico. No método da curva-guia é preciso considerar a condição de quando idade do povoamento (I) for igual a idade-índice (I_i) a altura dominante (Hd) será igual ao índice de sítio (S) (coloque em termos de fórmula). Os passos da transformação algébrica são apresentados a seguir: substituindo-se as variáveis Hd e I da equação 2 por S e I_i , respectivamente, obtém-se a equação 3. Depois, isolando o coeficiente β_0 da equação 3 obtendo-se a equação 4; substituindo (4) em (2) obtém-se a equação 5 que permite estimar altura dominante. Ainda, isolando-se o S da equação 5, pode-se obter a equação para estimar o índice de sítio equação 6.

$$S = \frac{\beta_0}{(1+\beta_1 e^{-\beta_2 I_i})} \quad (3)$$

$$\beta_0 = S(1 + \beta_1 e^{-\beta_2 I_i}) \quad (4)$$

$$Hd = \frac{S(1+\beta_1 e^{-\beta_2 I_i})}{(1+\beta_1 e^{-\beta_2 I})} \quad (5)$$

$$S = \frac{Hd(1+\beta_1 e^{-\beta_2 I})}{(1+\beta_1 e^{-\beta_2 I_i})} \quad (6)$$

Em que: S = índice de sítio em m, β_0 , β_1 e β_2 = coeficientes do modelo, I_i = idade-índice em meses, Hd = altura dominante em m, I = idade em meses.

Para o ajuste do modelo de Clutter (equações 7 e 8) foram utilizadas somente as unidades amostrais que apresentavam, no mínimo, três idades de medições; nesse caso foram utilizadas 458 observações para cada variável.

$$\ln(G_2) = \ln(G_1) \left(\frac{I_1}{I_2}\right) + \alpha_0 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) + \alpha_1 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) S + \varepsilon \quad (7)$$

$$\ln(V_2) = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{I_2}\right) + \beta_2 S + \beta_3 \ln(G_2) + \varepsilon \quad (8)$$

Em que: Ln = logaritmo neperiano, G_2 = área basal futura em $m^2 \cdot ha^{-1}$, G_1 = área basal corrente em $m^2 \cdot ha^{-1}$, I_1 e I_2 = idades corrente e futura em meses, S = índice de sítio em m, V_2 = volume futuro em $m^3 \cdot ha^{-1}$, α_0 , α_1 , β_0 , β_1 , β_2 , β_3 = coeficientes do modelo e ε = erro da estimativa.

3.3. Avaliação do ajuste

Para avaliação da capacidade produtiva foram gerados gráfico de feixes de curvas e tabela com valores de índice de sítio inferior, superior e médio, para cada idade-índice.

A avaliação do ajuste do modelo de Clutter foi realizada utilizando o teste t, o coeficiente de determinação ajustado, resíduos normalizados (equação 9), resíduo estimado *versus* observado, coeficiente de variação (equação 10), Bias (equação 11) e a raiz quadrada do erro médio (equação 12).

$$\hat{d}_i = \frac{(y_i - \hat{y}_i)}{\sqrt{QME}} \quad (9)$$

$$CV(\%) = \frac{\sqrt{QME}}{\bar{y}} 100 \quad (10)$$

$$Bias(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right)}{n} 100 \quad (11)$$

$$RQEM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (12)$$

Em que: \hat{d}_i = erro normalizado em m^3ha^{-1} , y_i = volume observado em m^3ha^{-1} , \hat{y}_i = volume estimado em m^3ha^{-1} , QME = quadrado médio do erro, CV = coeficiente de variação, \bar{y} = volume médio em m^3ha^{-1} , n = número de observações, RQEM = raiz quadrada do erro médio.

O modelo logístico foi ajustado no *software* CurveExpert professional versão 2.7.3 devidamente licenciado, enquanto o modelo de Clutter foi ajustado utilizando o pacote lm do ambiente R (versão 4.2.0.1) e do RStudio (versão 2022.02.3 +492). As demais estimativas: índice de sítio, altura dominante, área basal e volume, bem como os gráficos e cálculos dos critérios estatísticos foram feitos no Microsoft Excel® professional plus 2019, devidamente licenciado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Influência no índice de sítio

O índice de sítio (S) aumentou à medida que se aumentou a idade-índice (Tabela 1), bem como os limites inferior e superior de sítio aumentou para as maiores idades-índices. O índice de sítio médio foi de 11 m para idade-índice de 24 meses, enquanto para 72 meses foi igual a 21 m, representando aumento de quase 100%. Nos estudos sobre avaliação da capacidade produtiva a recomendação é utilizar a idade-índice próxima à rotação, sendo a idade de 6 anos (72 meses) muito utilizada (SALLES et al., 2012; SANTOS, 2012). Dessa forma, o uso de I_i diferente implica em alteração nos valores de sítio, o que implica esses valores não podem ser comparados diretamente. Campos; Leite (2017) apresentam um procedimento quando se faz necessária a comparação de valores de S estimados para diferentes I_i .

Porém, os valores de sítio não apresentam aumentam linear, o que se deve ao comportamento biológico do crescimento da altura dominante, que cresce mais acentuadamente no início da vida da árvore e tende a estabilizar ao longo do tempo.

Tabela 1. Índice de sítio mínimo, médio e máximo para idades-índices de 24, 36, 48, 60, 72, 84 e 96 meses, em povoamento de eucalipto.

Índice de sítio (m)	Idade-índice (meses)						
	24	36	48	60	72	84	96
S inferior	7	9	11	13	14	15	16
S médio	11	14	16	19	21	22	23
S superior	15	19	22	26	28	30	31

Os feixes de curva de índice de sítio também mudaram conforme as idades-índices relacionadas (Figura 1) em razão da mudança da amplitude (mínima e máxima) do sítio. A escolha de cinco classes de sítio foi arbitrária e padronizada para todas as idades-índices e seus valores foram calculados e, posteriormente, a amplitude de classe foi alterada para melhor representação gráfica, sendo mantida a amplitude de classe de 3,0 m a partir de 60 meses.

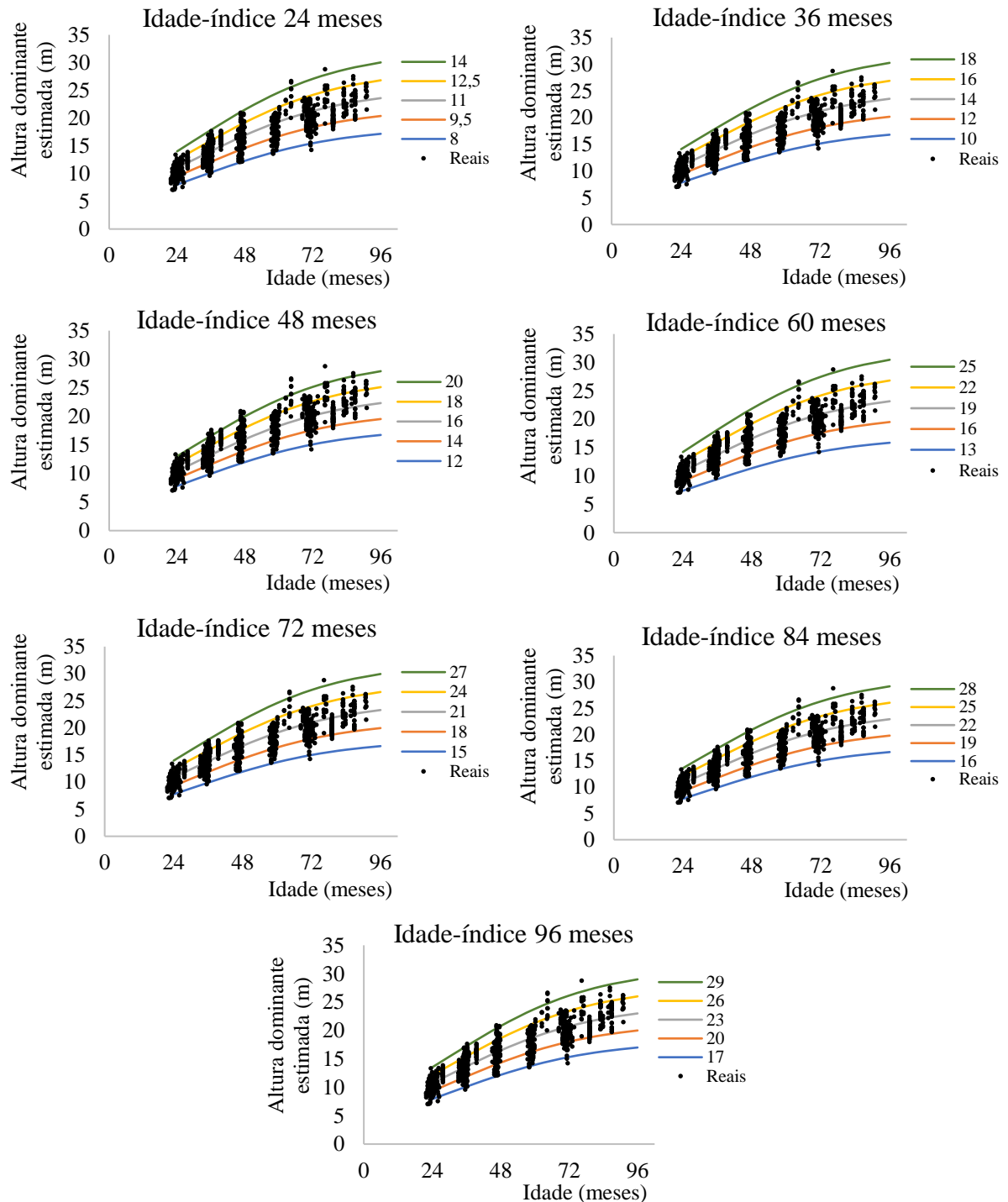


Figura 1. Gráficos de feixe de curvas de índice de sítio para 5 classes de capacidade produtiva de um povoamento de eucalipto, para idades-índices de 24, 36, 48, 60, 72, 84 e 96 meses.

Para idades maiores essa amplitude total foi de 12 m, o que permite maior flexibilidade na escolha das classes e sua amplitude entre classes, inclusive na possibilidade de incluir mais classes de capacidade produtiva. Santos (2012) também obteve curvas que não cobriam toda a variação dos dados e com amplitudes distintas para grupos heterogêneos de clones de eucalipto.

Resultados diferentes poderiam ser encontrados se fossem utilizados outros métodos além do da curva-guia, por exemplo da equação das diferenças, como constatado por Dias et al. (2005a) métodos diferentes podem apresentar resultados distintos.

4.2. Influência na produção em área basal e volume

No caso da prognose da área basal e volume, o modelo de Clutter apresentou todos os coeficientes significativos ($p < 0,001$) Os coeficientes foram iguais independentemente da idade-índice, exceto α_1 e β_2 , que são os coeficientes associados ao índice de sítio (Tabela 2).

Tabela 2. Valores dos coeficientes das equações geradas pelo ajuste do modelo de Clutter na prognose de área basal e volume em povoamento de eucalipto.

Coeficientes	Idade índice (meses)						
	24	36	48	60	72	84	96
α_0	2,23117	2,23117	2,23117	2,23117	2,23117	2,23117	2,23117
α_1	0,09517	0,074609	0,061907	0,05406	0,049213	0,046219	0,044369
β_0	0,72768	0,72768	0,72768	0,72768	0,72768	0,72768	0,72768
β_1	-16,4517	-16,4517	-16,4517	-16,4517	-16,4517	-16,4517	-16,4517
β_2	0,04678	0,03667	0,03043	0,02657	0,02419	0,02272	0,02181
β_3	1,44726	1,44726	1,44726	1,44726	1,44726	1,44726	1,44726

Onde: α_0 e α_1 são coeficientes da equação da área basal; β_0 , β_1 , β_2 e β_3 são coeficientes da equação de volume.

Os coeficientes associados as idades presente e futura não se alteraram (α_0 e β_1), pois se trata da mesma base de dados. O β_3 também não mudou, provavelmente pela influência das estimativas da área basal, variável associada a este coeficiente, foram iguais independente da idade-índice. Isso se repetiu nos resultados do volume, que também não mudaram. A alteração nos valores de α_1 e β_2 demonstraram padrão de decréscimo conforme aumento da idade-índice. Ambos decrescem cada vez menos, com tendência de estabilização (Figura 2).

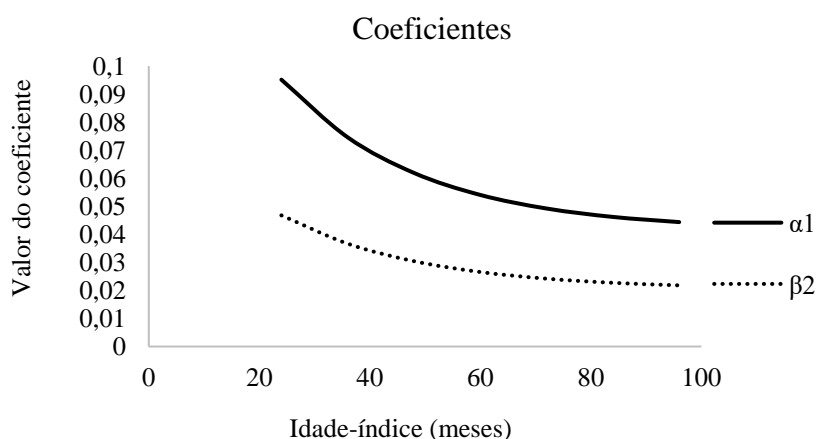


Figura 2. Gráfico de decréscimo dos valores dos coeficientes do modelo de Clutter associados à variável sítio conforme variação da idade-índice de um povoamento de eucalipto.

Mas, conforme a idade-índice aumenta, aumentam também as estimativas de sítio, conforme já comentado. Esse decréscimo nos valores dos coeficientes associados ao sítio compensam o aumento dos próprios valores de sítio encontrados, de forma que os resultados encontrados para área basal e volume dão os mesmos. Resultado similar foi encontrado por Xavier (2022), que obteve diferentes valores de sítio oriundos de diferentes métodos de construção de curvas, porém esses valores não influenciaram nas estimativas de produção do volume pelo mesmo modelo.

Como as curvas de índice de sítio geradas foram curvas anamórficas, com a mesma inclinação, é considerado que as taxas de crescimento das árvores nos diferentes sítios é a mesma, o que não representa a realidade biológica. Nesse sentido, curvas anamórficas geram valores de sítio com progressão constante, o que pode ter influenciado nos coeficientes do modelo de Clutter. Neto e Silva (2022) observaram diferenças nas estimativas de sítio quando utilizaram métodos que geravam curvas anamórficas e polimórficas. Curvas polimórficas poderiam ainda modificar as estimativas de área basal e volume, já que os índices de sítio estimados seriam diferentes, como verificado por Scavinski (2014).

Como as estimativas de volume foram as mesmas, independente das idades-índices, optou-se por apresentar os resultados de volume considerando somente a idade-índice de 72 meses. Porém, verifica-se uma dispersão de pontos sem tendências e média próximos a zero (0,288), com maioria dos erros normalizados dentro da faixa de -3 a 3, ideal.

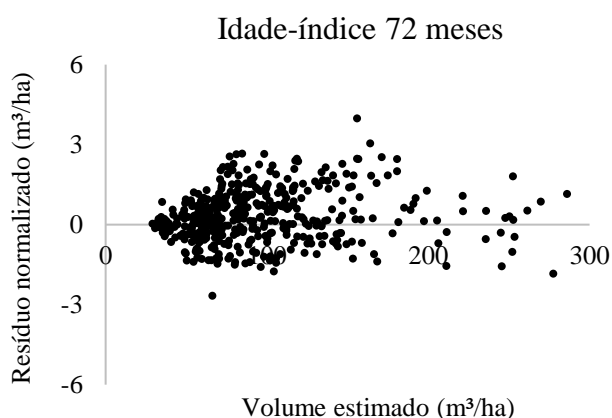


Figura 3. Gráficos de dispersão de resíduos normalizados das estimativas de volume pelo modelo de Clutter de um povoamento de eucalipto, para idade-índice de 72 meses.

Os critérios estatísticos calculados foram os mesmos para todas as idades-índices em ambas equações de área basal e do volume, sendo resumidos a um valor (Tabela 3). Devido à extensão da área de estudo e grande quantidade de dados, estes possuem alta variação (de 6,939 a 306,418 $m^3 \cdot ha^{-1}$), portanto o CV foi considerado satisfatório, inferior ao valor de 43,16% encontrado por Castro et al. (2015).

Tabela 3. Critérios estatísticos calculados para avaliação do ajuste do modelo de Clutter na estimativa da área basal (G) e volume (V) em povoamento de eucalipto.

Critérios estatísticos	Área basal ($m^2 \cdot ha^{-1}$)	Volume ($m^3 \cdot ha^{-1}$)
R ² ajustado	0,8443	0,9734
CV %	11,04	18,02
Bias %	1,35	0,92
RQEM	1,34	17,74

Os resultados de Bias para ambas as estimativas foram baixos assim como o RQEM calculado para estimativa da área basal. Já o RQEM obtido para o volume apresentou maior valor, superior aos de Penido e colaboradores (2021) que encontraram 5,76 para área basal e 8,50 para o volume de um povoamento de eucalipto no estado de Minas Gerais.

O alto valor de R^2 ajustado, principalmente do volume ($R^2=0,9734$) indica alto grau de ajuste da variável dependente com as independentes. Resultados de R^2 similares foram encontrados por Mello, Eisfeld e Sanquetta (2005) para o mesmo modelo em povoamento de eucalipto na região de Bofete, São Paulo, com 0,96 para equação da área basal e 0,98 para o volume.

Os valores de volume observados *versus* estimados seguem bem aderidos a reta $y = x$ dos gráficos, indicando resultados de volume observados bem próximos dos reais e sem apresentar um viés, com coeficiente de inclinação da reta próximo a 1 (1,0384) indicando resultado das estimativas de volume próximo dos valores reais. Como os resultados foram iguais, apresenta-se apenas o gráfico da idade-índice de 72 meses (Figura 4). Portanto, o modelo de Clutter teve um bom ajuste para essa base de dados.

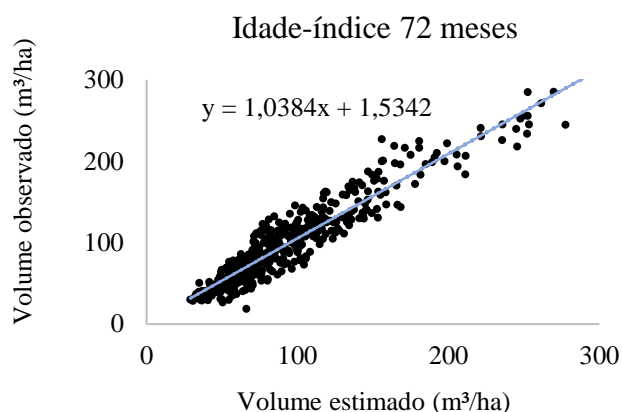


Figura 4. Gráficos de dispersão dos valores observados e estimados do volume de um povoamento de eucalipto, para idade-índice de 72 meses.

5. CONCLUSÃO

Com base nos resultados conclui-se que a escolha da idade-índice tem influência na estimativa dos índices de sítio e, portanto, na construção das curvas de índice de sítio.

A idade-índice influencia nos coeficientes do modelo de Clutter apenas associados à variável sítio, mas as estimativas de área basal e volume não são afetadas.

A recomendação estabelecer é de se utilizar a idade-índice próximo a idade técnica de corte, como forma prática para efeitos comparativos com outros estudos.

6. REPEREÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 5. ed. Viçosa: Editora UFV, 2017.

CASTRO, R. V. D. O. *et al.* Growth and production modeling for a *Eucalyptus* population by the use of two methods for the quantification of the site index. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 105, p. 83–90, 2015.

CASTRO, R. V. O. *et al.* Modelagem do crescimento e da produção de povoamentos de eucalyptus em nível de distribuição diamétrica utilizando índice de local. **Revista Árvore**, v. 40, n. 1, p. 107–116, 2016.

CLUTTER, J. L. Compatible growth and yield models for loblolly pine. **Forest Science**, v. 9, 1963.

COSENZA, D. N. *et al.* Classificação da capacidade produtiva de sítios florestais utilizando máquina de vetor de suporte e rede neural artificial. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 108, p. 955–963, 2015.

DALOSTO, J. A. D.; COLTURATO, S. C. O.; PASQUALETTO, A. Classificação da capacidade produtiva de povoamentos de eucalipto a partir de parcelas temporárias. **Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer**. Goiânia. v.13 n.23, p. 1637–1648, 2016.

DIAS, A. N. *et al.* Avaliação de métodos de ajuste de curvas de índice de local em povoamento de eucalipto desbastados. **Revista Árvore**, v. 29, n. 5, p. 741–747, 2005a.

DIAS, A. N. *et al.* Emprego de um modelo de crescimento e produção em povoamentos desbastados de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 29, n. 5, p. 731–739, 2005b.

DOSSA, D. *et al.* Produção e rentabilidade dos eucaliptos em empresas florestais. Comunicado Técnico 83 - **EMBRAPA Florestas**. v. 1, n. 83, p. 4, 2002.

GONÇALVES, J. C. *et al.* Comparação dos modelos prognósticos de Clutter e da função Logística. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 87, p. 311, 2016.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual IBÁ**. 2021. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2021-compactado.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2022.

JUNIOR, G. de F. **A história ambiental dos eucaliptos: Austrália, Brasil e Vale do Paraíba Paulista**. Universidade de Taubaté. São Paulo. p. 28, 2014.

LEITE, H. G.; ANDRADE, V. C. L. DE. Importância das variáveis altura dominante e altura total em equação hipsométricas e volumétricas. **Revista Árvore**, v. 27, n. 3, p. 301–310, 2003.

LEITE, H. G. *et al.* Classificação da capacidade produtiva de povamentos de eucalipto utilizando diâmetro. **Silva Lusitana** v. 19, n. 031, p. 15, 2009.

MARTINS, F. B. *et al.* Classificação climática de köppen e de thornthwaite para minas gerais: cenário atual e projeções futuras. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 8642, p. 129–156, 2018.

MELLO, A. A. de; EISFELD, R. D. 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**, v.1. p. 239–256, 2005.

MELO, E. DE A. *et al.* Modelagem não linear da relação hisométrica e do crescimento das

árvores dominantes e codominantes de *Eucalyptus* sp. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 4, p. 1325–1338, 2017.

MIGUEL, E. P. *et al.* Classificação de sítio para plantios de *Eucalyptus urophylla* em Niquelândia, estado de Goiás. **Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer**, v. 7, n. 12, p. 1–11, 2011.

MURILO, R. *et al.* Classificação da capacidade produtiva para florestas de *Pinus taeda* L. na região oeste do estado de Santa Catarina. **Scientia Agraria Paranaensis**. p. 211–218, 2017.

NETO, L. F. C.; SILVA, E. N. **Multiplicidade das Ciências Agrárias**. In vivo. v. 2, 2022.

NEWMANN, A. L.; SNAPP, R. R. **Beef cattle**. 7. ed. New York: John Willey, 1977. 883 p.

OLIVEIRA, M. L. R. *et al.* Classificação da capacidade produtiva de povoamentos não desbastados de clones de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 11, p. 1559–1567, 2008.

PENIDO, T. M. A. *et al.* Growth and production models for volumetric estimates in commercial eucalypt stands. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 128, p. 1–12, 2021.

SALLES, T. T. *et al.* Modelo de Clutter na modelagem de crescimento e produção de eucalipto em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 2, p. 253–260, 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**. 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**. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Paraná, 2014.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria Florestal: modelos de crescimento e produção florestal**. Lavras: UFLA/FAEPE. 2006

SILVA, A. V. DOS S. *et al.* Classificação de sítio em plantio florestal de eucalipto no estado do Amapá. **Revista Arquivos Científicos (IMMES)**, v. 3, n. 1, p. 106–110, 2020.

SILVA, F. R. DA *et al.* Aplicação do modelo de Schumacher para expressar a capacidade produtiva em um plantio jovem de *Tectona grandis*. **Advances in Forestry Science**, v. 2, n. 4, p. 79–84, 2015.

SILVA, J. N. M. **Manejo Florestal**. 2. ed. EMBRAPA, 1996.

SILVA, M. N. da. **População de plantas e adubação de nitrogenada em algodoeiro herbáceo irrigado**. 2001. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2001.

SOARES, C. P. B. *et al.* Especificação de um modelo de crescimento e produção florestal.

Revista Árvore, v. 28, n. 6, p. 831–837, 2004.

TONINI, H.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. Curvas de índice de sitio para povoamentos clonais de *Eucalyptus saligna* Smith para a Depressão Central e Serra do Sudeste, Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, v. 16, n. 1, p. 27–43, 2006.

XAVIER, L. V. **Métodos de construção de curvas de sitio e suas implicações na prognose da produção de povoamentos de *Eucalyptus* sp.** Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Uberlândia, v. 33, n. 1, p. 1–12, 2022.

ZIECH, B. G. *et al.* Modelos de crescimento em altura dominante e índice de sitio para Teca em Glória D'Oeste-MT. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 34, n. 4, p. 533–542, 2016.

APÊNDICE: TABELAS

Tabela 4. Valores de coeficientes (todos significativos a 0,001%) e critérios estatísticos das equações de volume dos estratos geradas pelo ajuste do modelo de Schumacher e Hall.

Estrato	β_0	β_1	β_2	QMres	Média	R^2_{aj}	Syx ($m^3 \cdot ha^{-1}$)	CV (%)
2013_2_CC7	-10,029	1,887065	1,056302	3,13E-05	0,207147	0,993173	0,005596	2,701391
2014_1_CC7	-10,9237	1,727524	1,472479	6,44E-05	0,206773	0,991885	0,008026	3,881669
2015_1_CC2	-9,70434	1,688579	1,092147	9,79E-07	0,020189	0,988429	0,000989	4,900525
2015_2_CC2	-9,26809	1,75156	0,84277	4,59E-07	0,018014	0,994032	0,000677	3,760627
2015_2_CC9	-10,7973	1,689693	1,466933	8,08E-05	0,217747	0,990348	0,008991	4,129258
2016_1_CC3	-10,206	1,518384	1,47216	9,74E-07	0,039245	0,993209	0,000987	2,515145
2016_2_CC2	-9,43239	1,773128	0,902188	2,26E-06	0,025086	0,993133	0,001504	5,996545
2016_2_CC3	-9,82257	1,601466	1,218027	2,73E-06	0,030362	0,996321	0,001653	5,445444
2017_1_CC2	-9,46414	1,905168	0,809538	1,83E-06	0,0284	0,993497	0,001351	4,758568
2017_1_CC4	-9,95357	1,747002	1,15035	4,53E-06	0,055553	0,990528	0,002129	3,832072
2017_2_CC3	-9,13725	1,934929	0,660533	5,47E-06	0,050236	0,993778	0,00234	4,657469
2017_2_CC4	-9,62888	1,992903	0,810694	7,57E-06	0,057392	0,995146	0,002752	4,795533
2018_1_CC3	-9,20811	1,726349	0,883105	1,25E-06	0,038455	0,990635	0,001118	2,908137
2018_1_CC5	-11,3879	1,396679	1,998569	1,27E-05	0,069713	0,994363	0,003569	5,119572
2018_2_CC2	-9,93083	1,69174	1,184834	8,94E-07	0,025891	0,995845	0,000945	3,651591
2018_2_CC4	-9,37001	2,070055	0,642967	1,3E-05	0,071647	0,9948	0,003601	5,025503
2018_2_CC5	-10,2855	1,538654	1,438297	7,62E-06	0,093172	0,995093	0,00276	2,961973
2019_1_CC2	-9,78674	2,013199	0,844661	3,11E-06	0,028217	0,992046	0,001765	6,254323
2019_1_CC4	-10,0607	1,850414	1,096127	4,87E-06	0,071688	0,995447	0,002206	3,077876
2019_2_CC2	-9,84447	1,868001	1,022305	1,01E-06	0,017895	0,992137	0,001006	5,623707
2019_2_CC3	-10,3716	1,791108	1,264449	5,58E-06	0,061051	0,994665	0,002362	3,869278
2019_2_CC5	-9,42817	1,810463	0,924966	6,35E-05	0,109827	0,979788	0,007969	7,256165
2019_2_CC6	-10,1929	1,842179	1,137476	3,26E-05	0,10755	0,995929	0,005711	5,310272
2020_1_CC3	-8,68901	1,984706	0,443801	1,49E-05	0,052895	0,977231	0,003854	7,287032
2020_1_CC5	-9,85915	1,835339	1,041314	1,62E-05	0,109817	0,992609	0,004022	3,662505
2020_2_CC3	-9,30024	2,056843	0,628662	6,49E-06	0,054652	0,9907	0,002548	4,661577
2020_2_CC4	-9,87412	1,900731	0,978735	1,35E-05	0,09871	0,990133	0,003668	3,716004
2020_2_CC6	-9,71149	1,970786	0,883877	3,12E-05	0,143701	0,992859	0,005583	3,885276

Onde: O estrato é composto por três códigos, sendo o primeiro o ano de plantio; o segundo o semestre de plantio; e o terceiro o valor do centro de classe (CC) de idade em anos; β_0 , β_1 , β_2 são coeficientes do modelo de Schumacher e Hall; QMres é o quadrado médio do resíduo do ajuste do modelo; Média é a média dos valores de volume estimados; R^2_{aj} é o coeficiente de determinação ajustado; Syx é o erro padrão da estimativa; e CV é o coeficiente de variação.

Tabela 5. Valores de coeficientes (todos significativos a 0,001%) e critérios estatísticos das equações genéricas de volume geradas pelo ajuste do modelo de Schumacher e Hall.

Estrato	β_0	β_1	β_2	QMres	Média	R ² aj	Syx (m ³ .ha ⁻¹)	CV (%)
CC2	-9,56433	1,84535	0,896912	1,65E-06	0,024096	0,991982	0,001284	5,328721
CC3	-9,56249	1,848993	0,908934	7,19E-06	0,047303	0,99126	0,002681	5,667205
CC4	-9,84823	1,875845	0,993649	9,15E-06	0,070996	0,994347	0,003025	4,260551
CC5	-9,97355	1,758123	1,147759	3,39E-05	0,094107	0,989532	0,005824	6,188993
CC6	-10,4657	1,787857	1,285879	4,39E-05	0,123983	0,993662	0,006627	5,344958
CC7	-10,221	1,844068	1,151949	6,4E-05	0,206953	0,991298	0,008002	3,866799
CC8	-10,4106	1,79267	1,256881	7,09E-05	0,210369	0,990526	0,00842	4,002568
CC9	-10,7973	1,689693	1,466933	8,08E-05	0,217747	0,990348	0,008991	4,129258

Onde: O estrato é composto por um código com valor do centro de classe (CC) de idade em anos; β_0 , β_1 , β_2 são coeficientes do modelo de Schumacher e Hall; QMres é o quadrado médio do resíduo do ajuste do modelo; Média é a média dos valores de volume estimados; R²aj é o coeficiente de determinação ajustado; Syx é o erro padrão da estimativa; e CV é o coeficiente de variação.