

MODELOS NÃO LINEARES APLICADOS PARA CLASSIFICAÇÃO DE SÍTIOS FLORESTAIS DE *Pinus Elliottii* E *pinus taeda*

Luan Demarco FIORENTIN¹
Rodrigo Otávio Veiga de MIRANDA¹
Julio Eduardo ARCE¹
Afonso FIGUEIREDO FILHO²
Saulo Jorge TÊO³
Reinaldo Hoinacki DA COSTA⁴

- RESUMO: O objetivo do presente trabalho foi testar modelos estatísticos para classificar os sítios de povoamentos de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, na região de Caçador, Santa Catarina, assim como propor o uso do teste de falta de ajuste para avaliar o anamorfismo das curvas de índice de sítio. A classificação dos sítios foi realizada pelo método da curva-guia, com uma idade de referência de 25 anos, e quatro modelos não lineares foram testados. A relação entre as alturas dominantes e os índices de sítio foi avaliada pelos testes de anamorfismo e o de falta de ajuste. Os modelos não lineares testados apresentaram desempenho semelhante nas estimativas de altura dominante, exceto o modelo de Clutter e Jones. O modelo de Bailey de 4 Parâmetros apresentou estatísticas de ajuste e precisão superiores para *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, e foi utilizado para construir as curvas de índices de sítio. O teste de anamorfismo, bem como o teste de falta de ajuste, indicaram que as curvas de índices de sítio seguem o padrão anamórfico para as espécies *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*. O teste de falta de ajuste foi adequado para avaliar o anamorfismo das curvas de índices de sítio.
- PALAVRAS-CHAVE: Índice de sítio; anamorfismo; teste de falta de ajuste.

1 Introdução

As espécies pertencentes ao gênero *Pinus* têm sido plantadas no Brasil há mais de um século, sendo muitas delas trazidas por imigrantes europeus, para fins ornamentais e também para produção de madeira. As principais espécies implantadas no país foram *Pinus elliottii* Engelm. e *Pinus taeda* L., as quais se destacaram pela facilidade nos tratamentos silviculturais, rápido crescimento e reprodução intensa no Sul e Sudeste do país (SHIMIZU, 2008). No Brasil, a área plantada com espécies de origem florestal atingiu 7,6 milhões de hectares (ha) no ano de 2013. Somente as espécies do gênero *Pinus*

¹Universidade Federal do Paraná - UFPR, Departamento de Ciências Florestais, CEP: 80.210-170, Curitiba, PR, Brasil. E-mail: luanfiorentin@hotmail.com; rov_miranda@yahoo.com.br; jarce@ufpr.br

²Universidade Estadual do Centro-Oeste - UNICENTRO, Centro de Ciências Agrárias e Ambientais, CEP: 84.500-000, Irati, PR, Brasil. E-mail: afonso@irati.unicentro.br

³Universidade do Oeste de Santa Catarina - UNOESC, Curso de Engenharia Florestal, CEP: 89.820-000, Xanxerê, SC, Brasil. E-mail: sauloteo@yahoo.com.br

⁴Empresa Juliana Florestal Ltda., CEP: 89.500-000, Caçador, SC, Brasil. E-mail: reinaldo@frameport.com.br

representaram 20,7% dessa área total, o que equivale a 1.570.146 ha, sendo 0,5% superior em relação ao indicador do ano de 2012 (IBÁ, 2014).

A extensa área plantada com *Pinus* no Brasil resulta em grandes variações na produção florestal, as quais são decorrentes das diferentes condições climáticas, edáficas, topográficas e biológicas de cada região, além, também, das características genéticas dos indivíduos, intrínsecas à espécie. Segundo Téo et al. (2011), manejar extensas áreas de florestas sem qualquer diferenciação do potencial produtivo pode propiciar resultados insatisfatórios. A determinação das classes de capacidade produtiva permite melhor avaliação quantitativa do povoamento e, conseqüentemente, a escolha de estratégias mais indicadas para melhorar a qualidade de cada sítio florestal.

Scolforo e Machado (1988) ressaltaram que a importância dessa classificação é muito mais ampla, pois pode ser a base da estratificação de povoamentos, tanto para o inventário florestal quanto para fins de manejo sustentável, ou ainda para clarificar os riscos e possibilidades de manejo, sendo, portanto, uma variável a ser considerada no planejamento local e regional, de curto a longo prazo.

O conceito de classificação de sítios florestais em classes homogêneas de produção foi desenvolvido pelos manejadores florestais ao longo do tempo, com a finalidade de homogeneizar as variações de produtividade e aperfeiçoar o manejo dos povoamentos florestais.

Em um termo mais amplo, o sítio refere-se a uma localização geográfica homogênea em relação às condições ambientais físicas e biológicas. Porém, um conceito florestal de sítio pode ser definido como o potencial do local para crescimento das árvores, que são submetidas a um manejo específico (SKOVSGAARD e VANCLAY, 2007).

De acordo com Clutter et al. (1983), no âmbito do manejo florestal, qualidade de sítio pode ser definida como o potencial de produção de madeira de um local, considerando uma espécie ou uma tipologia em particular. Dessa forma, o sítio florestal pode ser classificado ou quantificado quanto à sua capacidade de produção. Husch et al. (1983) caracterizaram a qualidade de sítio como um fator atrelado à produtividade de um povoamento florestal, adotando como referência o crescimento de variáveis da própria árvore ou do povoamento em determinado período de tempo.

A classificação de sítios baseada em variáveis do povoamento florestal, especialmente na altura média das árvores dominantes e codominantes, é comumente empregada por manejadores. No Brasil, a aplicação da altura dominante na classificação de sítios florestais iniciou-se pelas pesquisas de Heinsdijk e Soares (1962) e Machado (1980). Atualmente, esta variável ainda é amplamente empregada, como pode ser observado nas pesquisas de Machado *et al.* (2011), David *et al.* (2015) e Retslaff *et al.* (2015), e sua aplicação é devida à eficiência para estimar o potencial produtivo das florestas, além de ser pouco afetada por tratamentos silviculturais, tal como os desbastes (MACHADO *et al.*, 1997).

No entanto, recentemente, Scolforo *et al.* (2013) classificaram os sítios de *Eucalyptus grandis* W. Mill ex Maiden usando a altura dominante, mas incorporaram também as variáveis climáticas precipitação e temperatura média mensal. O modelo validado mostrou ganho em precisão de 33% no erro padrão da estimativa, em relação à modelagem sem a inserção de variáveis climáticas, demonstrando grande potencial de aplicação.

Na literatura florestal podem ser encontrados diferentes métodos para construção de curvas de índices de sítios baseadas nas alturas dominantes das árvores, mas com destaque ao método da curva-guia, empregado com maior frequência.

Clutter *et al.* (1983) ressaltaram que o método da curva-guia é geralmente usado para gerar curvas anamórficas de índices de sítios, e a fonte de dados pode ser proveniente de parcelas permanentes, temporárias ou análise do tronco completa. As curvas anamórficas se caracterizam por apresentarem a mesma relação de distância entre o conjunto de curvas construídas, o que permite concluir que os coeficientes responsáveis pela sua inclinação são constantes para todas as curvas e, conseqüentemente, o ponto de inflexão também é o mesmo (SPURR, 1952).

Para analisar o anamorfismo das curvas de índices de sítio e a conformidade do crescimento em altura dominante entre as classes de sítio, Kirby (1975) propôs validar as curvas a partir do ajuste de um modelo linear simples entre o índice de sítio e a altura dominante, para cada idade. Conforme esse autor, se o intercepto for zero e o coeficiente angular decrescer com o avanço das idades, as curvas apresentam padrão anamórfico. Scolforo (2006) também recomendou uma avaliação por meio do coeficiente de variação das alturas dominantes médias por classe de sítio e idade, uma vez que valores semelhantes desta estatística são esperados em diferentes idades para uma mesma classe de sítio. Clutter *et al.* (1983) sugeriram uma análise gráfica para verificar a estabilidade das curvas de sítio e a permanência das alturas dominantes de uma parcela dentro de uma única classe de sítio ao longo do seu desenvolvimento.

Devido à importância da classificação das áreas florestais quanto à sua produtividade, o objetivo do presente estudo foi ajustar modelos não lineares para classificar os sítios de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, localizados na região de Caçador, Santa Catarina, assim como verificar o anamorfismo das curvas de índices de sítio geradas. Além disso, o teste de falta de ajuste foi proposto para ser usado como estatística auxiliar para verificar o anamorfismo das curvas de índice de sítio.

2 Material e métodos

Os dados utilizados na presente pesquisa foram obtidos na empresa Juliana Florestal Ltda., com sede localizada na cidade de Caçador, pertencente ao estado de Santa Catarina, Brasil.

De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima predominante na região é o Cfb, ou seja, clima mesotérmico úmido, sem estação seca, com verões frescos e invernos rigorosos com geadas fortes. Segundo as informações meteorológicas da Estação Experimental de Caçador, a temperatura média anual é de 16,5°C, a precipitação média anual é de 1.608 mm, a umidade relativa do ar média anual é de 77%, com ocorrência de, em média, 26 geadas por ano (KURASZ, 2005).

Os principais tipos de solos encontrados na região são Cambissolos háplicos, com grande variação de profundidade e drenagem variando de acentuada à imperfeita, e Nitossolos brunos, de textura argilosa ou muito argilosa, em geral, moderadamente ácidos a ácidos (IBGE, 2007). A vegetação predominante é a Floresta Ombrófila Mista (FOM), sob a formação Floresta Ombrófila Mista Montana (IBGE, 2012).

2.1 Origem dos dados

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

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

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

A classificação de sítios para os povoamentos de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* foi realizada de forma independente para cada espécie, na qual foram utilizados 2.073 e 6.981 pares de dados de idade (I) e altura dominante (h_{dom}), respectivamente.

2.2 Classificação de sítios

Os povoamentos das espécies *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* foram classificados quanto à sua produtividade usando a altura dominante. O método da curva-guia, também denominada de curva-média, foi utilizado para a construção das curvas de sítio, para ambas as espécies. Esse método consiste em utilizar um modelo matemático (linear ou não linear) para representar a relação existente entre as variáveis idade e altura dominante. Dessa forma, a partir da equação da curva-guia, foi possível obter a equação de índice de sítio de modo que, quando a idade (I) do povoamento foi igual à idade de referência (I_r), a altura dominante (h_{dom}) foi igual ao índice de sítio (I) ($h_{dom} = S \leftrightarrow I = I_r$).

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

Portanto, visando obter estimativas mais precisas, foram testados quatro modelos matemáticos não lineares (Tabela 1) para estimar a altura dominante das árvores em função da idade e classificar os sítios florestais. Os modelos para gerar as curvas de índices de sítio também estão na Tabela 1.

Tabela 1 - Modelos testados para classificar os sítios florestais de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, localizados na região de Caçador, estado de Santa Catarina

Autor	Modelo	Modelo de Curva de Sítio
Bailey de 4 Parâmetros	$h_{dom} = \beta_0 \left(1 - \exp^{-\beta_1 I^{\beta_2}} \right)^{\beta_3}$	$h_{dom} = S \left(\frac{1 - \exp^{-\beta_1 I^{\beta_2}}}{1 - \exp^{-\beta_1 I_r^{\beta_2}}} \right)^{\beta_3}$
Chapman e Richards	$h_{dom} = \beta_0 \left(1 - \exp^{-\beta_1 I} \right)^{\beta_2}$	$h_{dom} = S \left(\frac{1 - \exp^{-\beta_1 I}}{1 - \exp^{-\beta_1 I_r}} \right)^{\beta_2}$
Clutter e Jones	$h_{dom} = \beta_0 \left(1 + \beta_1 I^{\beta_2} \right)^{\beta_3}$	$h_{dom} = S \left(\frac{1 + \beta_1 I^{\beta_2}}{1 + \beta_1 I_r^{\beta_2}} \right)^{\beta_3}$
Mitscherlich	$h_{dom} = \beta_0 \left(1 - \beta_1 \exp^{-\beta_2 I} \right)$	$h_{dom} = S \left(\frac{1 - \beta_1 \exp^{-\beta_2 I}}{1 - \beta_1 \exp^{-\beta_2 I_r}} \right)$

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

Os coeficientes estimados foram obtidos por meio do algoritmo *Rosenbrock Pattern Search*, no programa STATISTICA 7[®]. Os parâmetros iniciais foram obtidos na literatura florestal, em pesquisas sobre classificação de sítios de *Pinus*.

2.3 Análise do desempenho dos modelos

Para avaliar o desempenho dos modelos não lineares ajustados para a classificação de sítio, foram realizadas análises numéricas e gráficas.

O coeficiente de correlação ao quadrado (R_{yy^2}) foi utilizado no lugar do coeficiente de determinação R^2 , pois Regazzi (2010) afirmou que o R^2 somente deve ser aplicado em modelos de regressão linear que possuem o intercepto. O autor ainda destacou que os valores encontrados na literatura para essa estatística geralmente são extremamente elevados e próximos de $R^2 = 0,99$, mesmo havendo enormes discrepâncias entre os valores observados e aqueles preditos pelo modelo. É comum o engano de que o R^2 , “a proporção de variação explicada”, é uma estatística para ser usada na análise do desempenho de modelos não lineares. Somente quando se tem um modelo linear com o termo constante é que o R^2 representa a variação explicada pelo modelo. Portanto, o $R^2 = R_{yy^2}$ pode ser usado como uma aproximação mais adequada para essa estatística.

O erro padrão da estimativa em porcentagem (S_{yx}), em %, o viés (V), em m e o erro quadrático médio (MSE) também foram calculados como estatísticas auxiliares. A análise gráfica da dispersão dos resíduos (Resíduos), em %, foi realizada para avaliar possíveis tendências nas estimativas e homogeneidade na distribuição dos erros.

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

Todos esses critérios são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Critérios para análise do desempenho dos modelos ajustados

Critério	Equação
Coeficiente de correlação ao quadrado	$R_{y\hat{y}}^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n y_i \hat{y}_i - \frac{(\sum_{i=1}^n \hat{y}_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{n} \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n} \right] \left[\sum_{i=1}^n \hat{y}_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n \hat{y}_i)^2}{n} \right]}$
Erro padrão da estimativa em porcentagem	$S_{yx}\% = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-p}}}{\bar{y}_i} 100$
Viés	$V = \sum_{i=1}^n \frac{y_i - \hat{y}_i}{n}$
Erro quadrado médio	$MSE = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{n}$
Dispersão dos resíduos	$\text{Resíduos}\% = \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right) 100$
Critério de Informação de Akaike	$AIC = n \ln(\hat{\sigma}^2) + 2(p+1)$

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

2.4 Teste de anamorfismo das curvas

Para averiguar o anamorfismo das curvas geradas pelo modelo matemático de melhor desempenho, o teste de anamorfismo, proposto por Kirby (1975), foi aplicado aos

dados. Esse teste consistiu, basicamente, em verificar a existência de relação linear entre os índices de sítio (S) e as alturas dominantes (h_{dom}) médias nas diferentes idades. Para tanto foi utilizado o modelo de regressão linear simples $S = \beta_0 + \beta_1 h_{dom}$.

O teste foi aplicado nas idades de 12, 15, 25 e 30 anos para o *Pinus elliottii*, e nas idades de 10, 15, 25, e 30 anos para o *Pinus taeda*.

2.5 Teste de falta de ajuste

O teste de falta de ajuste (*lack of fit*) é comumente aplicado em experimentos estatísticos para verificar a adequação do modelo linear ajustado aos dados. Portanto, como pressupõem-se que os índices de sítios são dependentes apenas das alturas dominantes das árvores e não da idade dos povoamentos florestais, o teste foi proposto para ser utilizado como uma estatística auxiliar na análise do anamorfismo das curvas de índice de sítio.

Esse teste requer repetições da variável dependente para um ou mais níveis (valores) da variável independente. Dessa forma, os três índices de sítio de determinada idade foram definidos como as variáveis independentes (S) e os valores observados da altura dominante (h_{dom}) como variáveis dependentes, conforme descrito na expressão $h_{dom} = \beta_0 + \beta_1 S$.

O teste foi aplicado nas idades de 18, 25 e 27 anos para *Pinus elliottii*, e nas idades de 7, 25 e 27 anos para *Pinus taeda*, pois, nessas idades, houve dados em todas as classes de sítio (Tabela 3).

Tabela 3 - Número de dados (N) de altura dominante e coeficiente de variação (CV %) em cada idade de avaliação do teste de falta de ajuste, para *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, localizados na região de Caçador, estado de Santa Catarina

Idade (anos)	Classe de sítio	Índice de Sítio	N	CV (%)	Idade (anos)	Classe de sítio	Índice de Sítio	N	CV (%)
<i>Pinus elliottii</i>					<i>Pinus taeda</i>				
18	1	27,0	5	1,48	7	1	13,8	158	2,91
	2	23,5	82	3,08		2	11,6	650	5,25
	3	20,0	17	2,76		3	9,4	142	3,49
25	1	33,3	10	1,37	25	1	35,4	46	2,52
	2	29,0	116	4,08		2	29,8	171	5,22
	3	24,7	38	2,83		3	24,1	60	3,45
30	1	36,6	7	1,27	30	1	39,5	25	2,83
	2	31,9	37	4,22		2	33,2	116	4,97
	3	27,1	11	2,50		3	26,9	35	3,13

2.6 Identidade dos métodos de estimativas

Para verificar a possibilidade de classificar o sítio com um único modelo matemático e, dessa forma, representar o crescimento em altura dominante para as duas espécies, o teste *F* de Graybill (GRAYBILL, 1976) foi aplicado aos dados, no qual foi verificada a identidade entre as h_{dom} estimadas das espécies *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*.

Esse procedimento foi realizado por meio do ajuste de um modelo linear simples dado por $h_{\text{dompad}} = \beta_0 + \beta_1 h_{\text{domalt}}$, em que a variável dependente representou o método padrão e a variável independente o método alternativo. No método padrão foram utilizadas as estimativas de h_{dom} provenientes do modelo não linear de melhor desempenho na classificação de sítios de cada espécie, enquanto no método alternativo foram utilizadas as estimativas de h_{dom} a partir de um único ajuste para ambas as espécies.

Assim, a identidade entre as variáveis foi verificada ao se testar a hipótese nula (H_0) de que o coeficiente β_0 e β_1 são estatisticamente iguais a 0 e 1, respectivamente, contra a hipótese alternativa (H_a) de rejeição. Para testar a hipótese formulada, aplicou-se a estatística F proposta por Graybill (1976) e apresentada na expressão

$$F_{\text{cal}} = \frac{(\beta - \theta)'(Y'Y)(\beta - \theta)}{2QM_{\text{res}}} \text{ em que: } \beta = \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \end{pmatrix}; \theta = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}; Y'Y = \begin{bmatrix} n & \sum Y \\ \sum Y & \sum Y^2 \end{bmatrix} \text{ e } QM_{\text{res}} = \text{quadrado}$$

médio do resíduo do método padrão.

Se o valor de F calculado (F_{cal}) for menor que o tabelado F_{α} (gl; n-2; 2), a hipótese H_0 não é rejeitada, admitindo a identidade entre os dois métodos testados.

3 Resultados e discussão

3.1 Análise exploratória dos dados

Na Figura 1 pode ser observado o boxplot que mostra a variação da altura dominante ao longo das idades, para as espécies *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*. De modo geral, pode-se notar que existe pequena variação da h_{dom} nas idades mais jovens, mas com tendência de aumentar a sua amplitude com o tempo. A pequena amplitude de variação da h_{dom} do *Pinus taeda* nas idades intermediárias pode ser atribuída a pequena quantidade de unidades amostrais em povoamentos com idades variando de 12 a 18 anos, como pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4 - Número de unidades amostrais por idade para *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, localizados na região de Caçador, estado de Santa Catarina

Idade (anos)	<i>Pinus elliottii</i>	<i>Pinus taeda</i>	Idade (anos)	<i>Pinus elliottii</i>	<i>Pinus taeda</i>
4	-	13	19	104	77
5	-	218	20	153	98
6	-	736	21	207	98
7	-	950	22	156	208
8	-	748	23	149	228
9	-	651	24	164	300
10	-	540	25	164	277
11	-	263	26	164	277
12	23	88	27	101	244
13	46	24	28	101	237
14	46	24	29	102	214
15	44	19	30	55	176
16	42	13	31	15	183
17	103	33	32	15	21
18	104	23	33	15	-

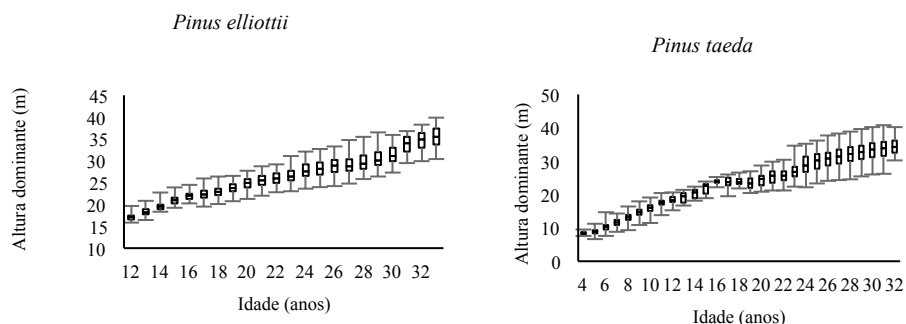


Figura 1 - Boxplot da altura dominante em diferentes idades de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, localizados na região de Caçador, estado de Santa Catarina.

Para o *Pinus elliottii*, a idade variou de 12 a 33 anos e a altura dominante de 15,85 a 39,86 m, e o coeficiente de variação CV (%) foi de 19,73 e 14,12, respectivamente. A amplitude dos dados do *Pinus taeda* foi maior, sendo que a idade oscilou de 4 a 32 anos e a altura dominante de 6,62 a 40,76 m, mas com CV (%) igual a 59,75 e 44,69, respectivamente.

3.2 Classificação dos sítios florestais

Na Tabela 5 estão os coeficientes estimados dos modelos não lineares testados para classificação de sítios das espécies *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, juntamente com as respectivas estatísticas de precisão.

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

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

Tabela 5 - Coeficientes estimados e estatísticas de ajuste e precisão dos modelos não lineares testados para classificar os sítios de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, localizados na região de Caçador, estado de Santa Catarina

Autor	Coeficientes	R_{yy}^2	Syx (%)	V (m)	MSE	AIC	Eq.
<i>Pinus elliottii</i>							
Bailey de 4 Parâmetros	b ₀	41,5634	0,795	6,398	0,002	2,835	2.163,967
	b ₁	0,0603					
	b ₂	0,9536					
	b ₃	1,2162					
Chapman e Richards	b ₀	41,0938	0,794	6,397	-0,003	2,836	2.163,256
	b ₁	-0,0500					
	b ₂	1,1172					
Clutter e Jones	b ₀	41,6092	0,786	6,556	-0,001	2,976	2.265,025
	b ₁	9,5992					
	b ₂	-1,3337					
	b ₃	-3,1656					
Mitscherlich	b ₀	41,2217	0,794	6,438	0,027	2,871	2.189,114
	b ₁	1,1153					
	b ₂	0,0506					
<i>Pinus taeda</i>							
Bailey de 4 Parâmetros	b ₀	41,3750	0,956	9,418	0,047	3,394	8.533,720
	b ₁	0,0001					
	b ₂	2,5875					
	b ₃	0,3043					
Chapman e Richards	b ₀	41,9763	0,954	9,575	0,022	3,509	8.764,167
	b ₁	-0,0516					
	b ₂	1,0781					
Clutter e Jones	b ₀	46,6110	0,944	10,558	0,065	4,266	10.129,523
	b ₁	-0,0652					
	b ₂	-0,8815					
	b ₃	119,7335					
Mitscherlich	b ₀	41,3904	0,954	9,661	-0,028	3,572	8.889,610
	b ₁	1,0214					
	b ₂	0,0508					

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

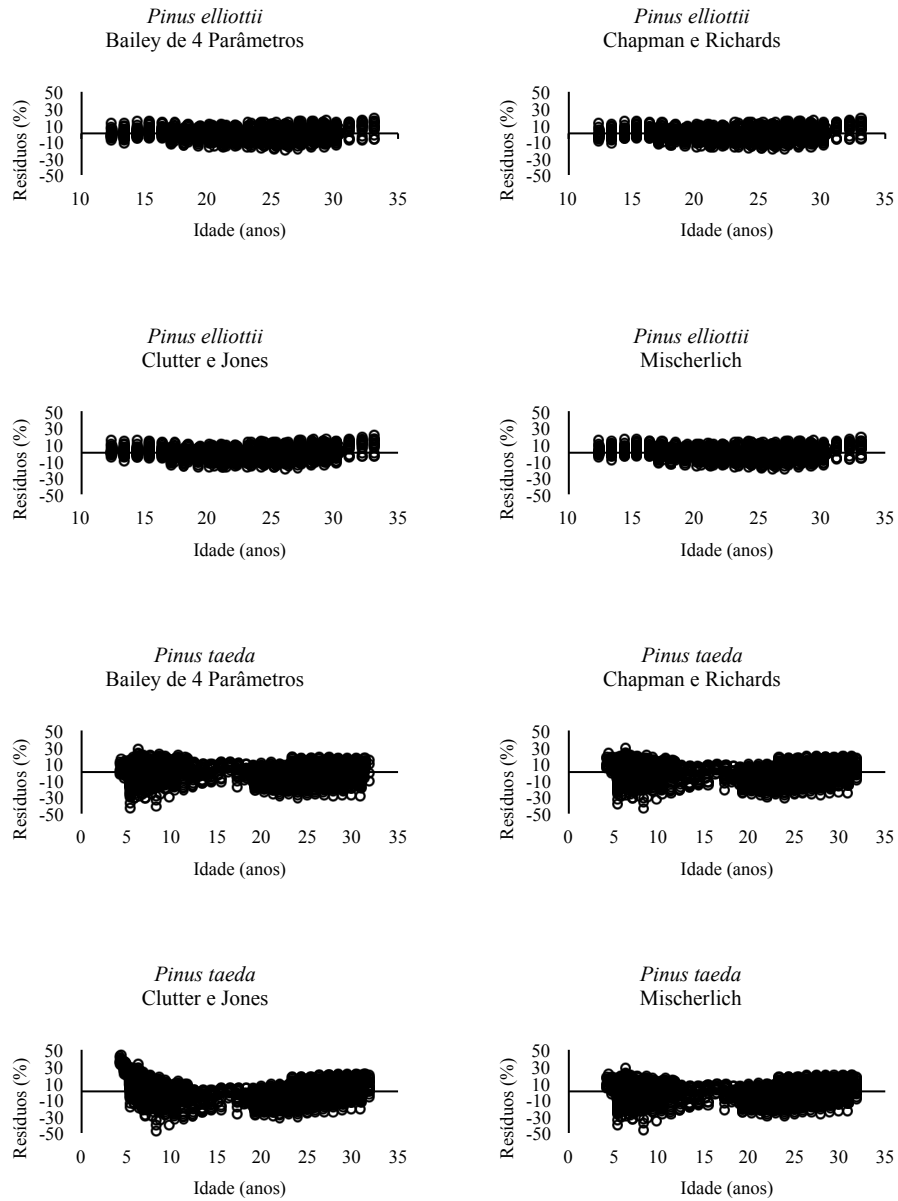


Figura 2 - Dispersão dos resíduos para os modelos não lineares testados para classificar os sítios de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, localizados na região de caçador, estado de Santa Catarina.

David *et al.* (2015) utilizaram o método da curva-guia para fazer a classificação de sítios florestais de *Pinus taeda*, localizados na região Sul do Brasil, na qual os R^2_{aj} dos modelos não lineares testados variaram de 0,80 a 0,81 e os Syx foram próximos de 12%.

A dispersão gráfica de resíduos foi tendenciosa nas estimativas de altura dominante para *Pinus elliottii*, como pode ser observado nas extremidades da dispersão, mas com baixa amplitude de variação. Porém, foram observadas subestimativas e superestimativas mais evidentes para *Pinus taeda*, com valores superiores a $\pm 40\%$, nas idades inferiores a 12 anos, o que pode ser atribuído a pequena quantidade de dados em algumas idades (Figura 2).

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

O modelo de Chapman e Richards apresentou as estatísticas de ajuste e precisão e a dispersão dos resíduos satisfatórias, sendo, de modo geral, ligeiramente inferior ao de Bailey de 4 Parâmetros. No presente estudo, os resultados desse modelo foram um pouco inferiores aos obtidos por Scolforo e Machado (1988) na classificação de sítios de *Pinus taeda*, nos estados do Paraná e Santa Catarina, e também em relação aos de Oliveira *et al.* (1998), na classificação de sítios de *Pinus elliottii*, na região Sul do Brasil.

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

A partir da seleção do modelo de melhor desempenho, que, neste caso, foi o de Bailey de 4 Parâmetros para ambas as espécies, foram construídas as curvas de índice de sítio (Figura 3) para *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, com idade de referência de 25 anos, na qual a amplitude das classes foi de 4,3 e 5,6 m, respectivamente.

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

Na Figura 3 também é possível observar que na classe intermediária, ou na classe II, ficou concentrada a maior parte dos pares de idade e altura dominante, para as duas espécies, seguido da classe I (superior) e III (inferior).

As curvas construídas para *Pinus taeda* foram notadamente mais inclinadas, indicando que o crescimento em altura dominante dessa espécie foi superior ao do *Pinus elliottii*. No entanto, esse resultado pode ter sido influenciado pelo predomínio de plantio do *Pinus taeda* em sítios melhores, diferentes técnicas de plantio, condução silvicultural dos povoamentos, material genético utilizado, entre outros fatores. Além disso, outro

importante fator pode estar relacionado com a expressiva diferença no banco de dados das duas espécies.

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

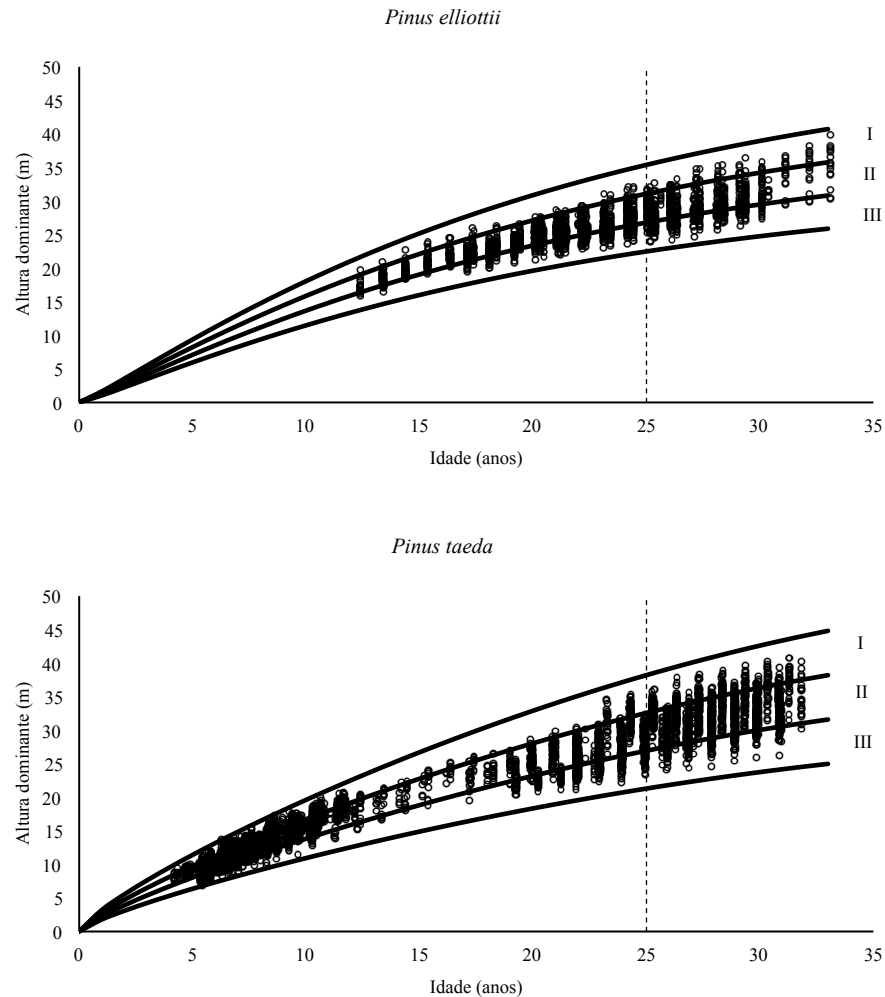


Figura 3 - Curvas de índices de sítio para *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, localizados na região de Caçador, estado de Santa Catarina.

Os limites inferior e superior das alturas dominantes das espécies *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, por classe de sítio e idade, estão apresentados na Tabela 6. A altura

dominante do *Pinus elliottii* variou de 22,5 a 35,4 m na idade de referência de 25 anos, na qual os índices médios de sítio foram 24,7, 29,0 e 33,3 m, para as classes III, II e I, respectivamente. A amplitude de variação foi maior no *Pinus taeda*, com valores entre 21,3 a 38,2 m, enquanto os índices médios de sítio foram 24,1, 29,8 e 35,4 m, para as classes III, II e I, respectivamente.

David *et al.* (2015) encontraram amplitude de variação na altura dominante de *Pinus taeda*, no Sul do Brasil, de 12,8 a 36,9 m, para quatro classes de sítio, também aos 25 anos de idade. A maior amplitude de variação encontrada por esses autores pode ser atribuída à maior variabilidade dos dados usados pelos mesmos, em comparação aos do presente estudo.

Tabela 6 - Limite inferior (LI) e limite superior (LS) das classes de sítio de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, localizados na região de Caçador, estado de Santa Catarina

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

3.3 Anamorfismo das curvas de sítio

O teste de anamorfismo foi aplicado para verificar o padrão anamórfico das curvas de sítio, estimadas pelo modelo de Bailey de 4 Parâmetros. Dessa forma, o modelo Bailey de 4 Parâmetros foi reajustado isolando-se a variável independente índice de sítio (I), na qual foi possível estimar os índices de sítio para qualquer idade, em função da altura dominante e a idade de referência pré-estabelecida, nesse caso, 25 anos. Esse procedimento foi aplicado aos dados de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, pois o mesmo modelo foi selecionado para ambas as espécies.

A relação linear entre às variáveis altura dominante e índice de sítio, para *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, em diferentes idades, pode ser observada na Figura 4. O ajuste do modelo linear mostrou que o coeficiente de interseção (b_0) foi muito próximo de zero em todas as idades consideradas.

Na Figura 5 podem ser observados os valores do coeficiente angular (b_1) do ajuste do modelo linear ao longo do tempo. Nota-se que o coeficiente angular apresentou clara tendência de reduzir o seu valor em função do avanço da idade. Ainda, o coeficiente angular foi igual a 1 na idade de referência, ou seja, aos 25 anos, indicando uma perfeita correlação entre as variáveis.

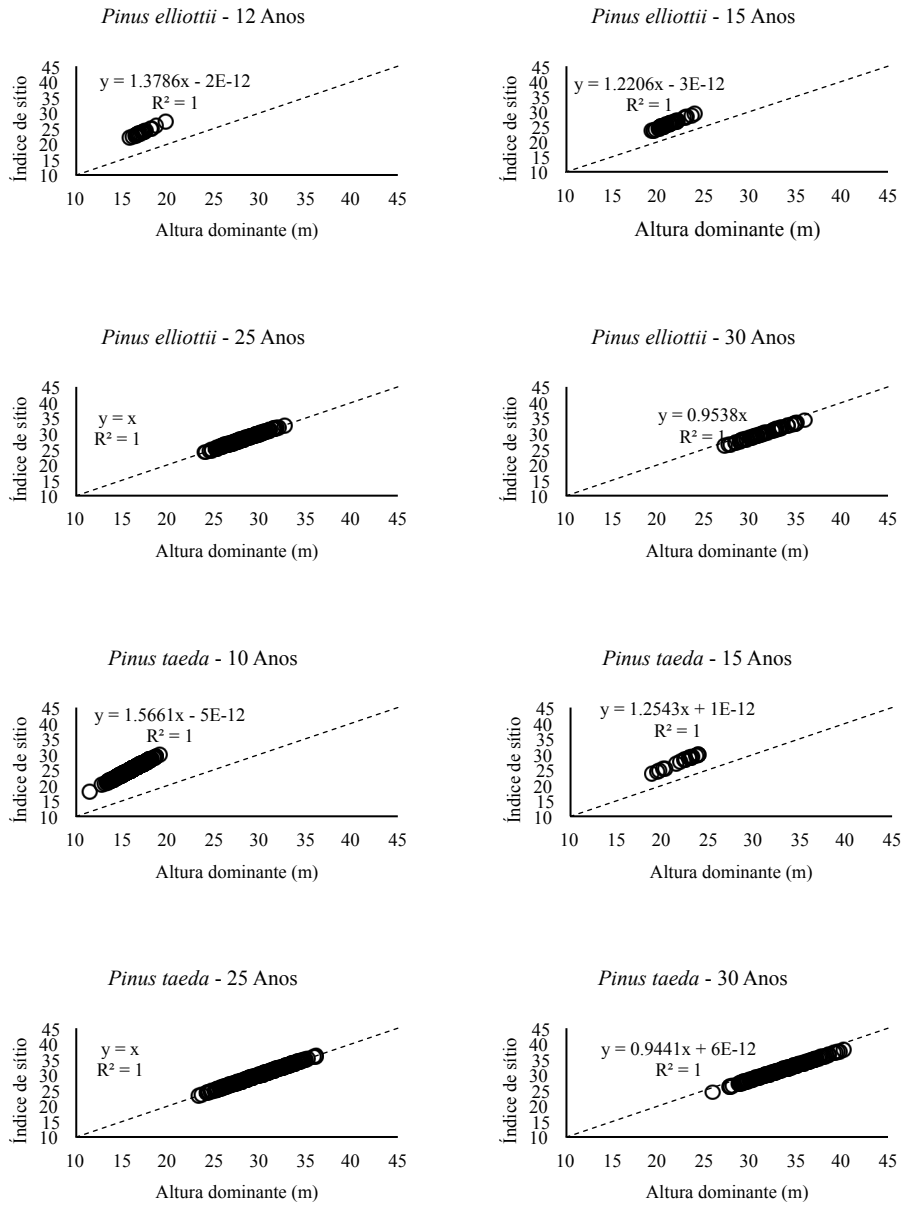


Figura 4 - Ajuste do modelo de regressão linear entre índice de sítio e altura dominante do teste de anamorfismo, em diferentes idades de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, localizados na região de Caçador, estado de Santa Catarina.

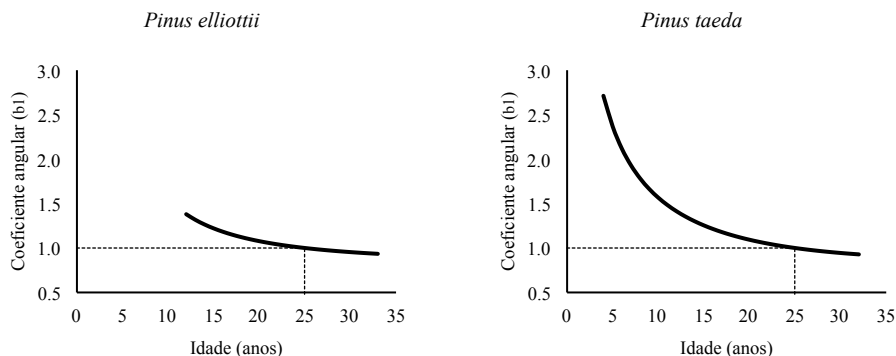


Figura 5 - Valor do coeficiente angular em diferentes idades de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, localizados na região de Caçador, estado de Santa Catarina.

O coeficiente de determinação (R^2) resultou em valor igual a 1 em todas as idades e para as duas espécies. Dessa forma, esses resultados confirmaram que há forte relação linear entre as variáveis, corroborando o fato de que o índice de sítio é dependente apenas da capacidade produtiva do local, ou seja, da altura dominante, e não da idade.

Semelhante ao presente estudo, o padrão anamórfico das curvas de sítio também foi verificado nos estudos de Scolforo e Machado (1988), Selle *et al.* (1994), Téio *et al.* (2011) e David *et al.* (2015) em povoamentos de *Pinus* spp., na região Sul do Brasil, enquanto Machado *et al.* (2011) observaram essa tendência em florestas nativas de *Mimosa scabrella*, no estado do Paraná. Esses resultados indicam que o anamorfismo das curvas é o padrão mais comum de ocorrência para essas espécies.

3.4 Teste de falta de ajuste

Na Figura 6 pode ser observado a dispersão da altura dominante em cada índice de sítio e para todas as idades que foi realizado o teste de falta de ajuste. É possível perceber que a reta da regressão tendeu a passar no meio da nuvem de pontos. No entanto, essa tendência não foi muito evidente para *Pinus elliottii*, principalmente para os maiores índices de sítio, o que pode estar relacionado com a pequena quantidade de dados nessa classe. O coeficiente de determinação (R^2) dos modelos ajustados para espécie *Pinus elliottii* foram sempre menores àqueles obtidos para *Pinus taeda*.

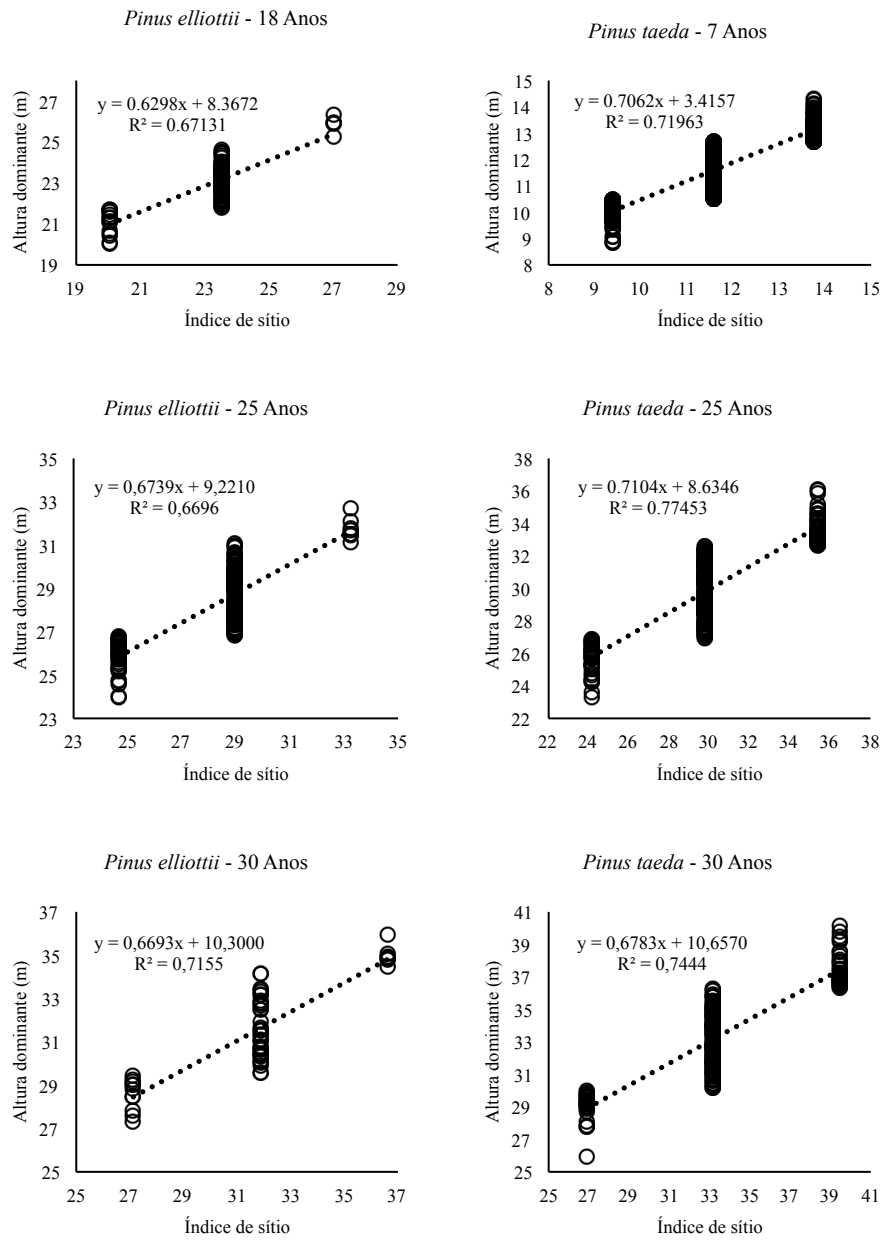


Figura 6 - Ajuste do modelo linear entre altura dominante e índice de sítio do teste de falta de ajuste, em diferentes idades de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, na região de Caçador, estado de Santa Catarina.

O teste de falta de ajuste indicou que o modelo linear foi adequado aos dados utilizados, pois o valor-p, ao nível de 5% de significância para falta de ajuste, foi não estatisticamente significativo em todas as idades, como pode ser observado na Tabela 7.

Portanto, a partir dos resultados desse teste pode-se inferir que existe relação linear entre as alturas dominantes observadas e os índices de sítio, para as diferentes idades de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, e que as curvas de índice de sítio construídas anteriormente seguem o padrão anamórfico. Além disso, esse teste indicou que as alturas dominantes tenderam a ocorrer com distribuição próxima da normal dentro de cada classe de sítio, com variação aleatória em torno da reta (erro puro).

Tabela 7 - Análise de variância do teste de falta de ajuste para diferentes idades de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, na região de Caçador, estado de Santa Catarina

Idade (anos)	Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	p-valor
<i>Pinus elliottii</i>						
18	Regressão	1	99,82	99,82	214,17	1,05E-26
	Resíduos	102	48,87	0,48		
	Falta de Ajuste	1	1,80	1,80	3,86	0,0521
	Erro Puro	101	47,07	0,47		
25	Regressão	1	362,96	362,96	326,36	1,45E-40
	Resíduos	162	179,10	1,11		
	Falta de Ajuste	1	0,04	0,04	0,04	0,8449
	Erro Puro	161	179,06	1,11		
30	Regressão	1	177,73	177,73	131,94	7,00E-16
	Resíduos	53	70,68	1,33		
	Falta de Ajuste	1	0,64	0,64	0,47	0,4941
	Erro Puro	52	70,04	1,35		
<i>Pinus taeda</i>						
7	Regressão	1	718,41	718,41	2430,89	9,40E-264
	Resíduos	948	279,90	0,30		
	Falta de Ajuste	1	0,03	0,03	0,10	0,7580
	Erro Puro	947	279,87	0,30		
25	Regressão	1	1686,38	1686,38	944,04	9,41E-91
	Resíduos	275	490,90	1,79		
	Falta de Ajuste	1	1,45	1,45	0,81	0,3687
	Erro Puro	274	489,46	1,79		
30	Regressão	1	1079,19	1079,19	504,73	3,55E-53
	Resíduos	174	370,47	2,13		
	Falta de Ajuste	1	0,57	0,57	0,27	0,6056
	Erro Puro	173	369,90	2,14		

3.5 Identidade das curvas de sítio

O teste de identidade de Graybill mostrou que há diferenças estatisticamente significativas ($F_{0,01} = 143,64$ e $p\text{-valor} = 0,0002$) entre as estimativas de altura dominante realizadas pelo método padrão (ajuste por espécie) e o método alternativo (ajuste geral). Na Figura 7 é possível observar a dispersão dos valores estimados das alturas dominantes pelos dois métodos, para os povoamentos de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, na qual as espécies apresentaram tendências de crescimento diferenciados.

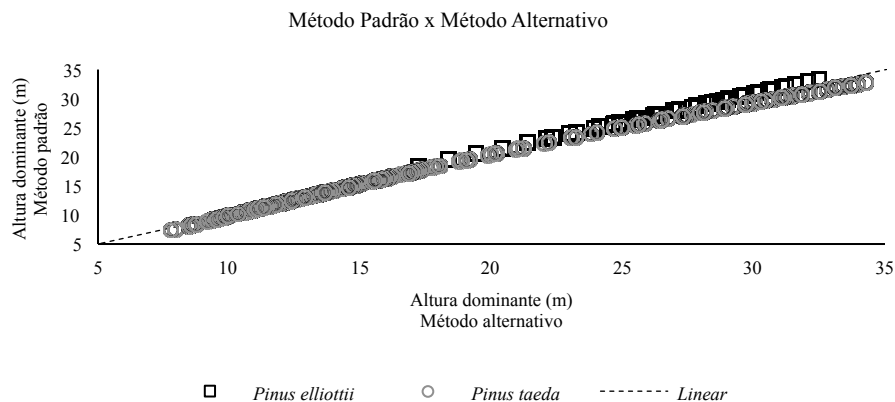


Figura 7 - Estimativas da altura dominante realizadas pelo método padrão e o método alternativo, para *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, localizados na região de Caçador, estado de Santa Catarina.

Diante desses resultados, fica evidente a necessidade de se fazer a classificação de sítio em nível de espécie, visto que as mesmas podem apresentar produções diferenciadas, principalmente em virtude dos fatores naturais, inerentes ao sítio, e também do manejo da floresta, como a preparação do solo, escolha da espécie, qualidade genética, espaçamento inicial e desbastes (SKOVSGAARD e VANCLAY, 2007).

4 Conclusões

Os modelos não lineares testados podem ser utilizados com segurança para fazer a classificação de sítios dos povoamentos de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* quanto à sua produtividade, pois resultam em estatísticas de ajuste e precisão bastante satisfatórias, exceto o modelo de Clutter e Jones.

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

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

O teste de falta de ajuste foi adequado para avaliar as curvas de índice sítio e pode ser utilizado como uma estatística auxiliar na análise do anamorfismo das curvas.

Agradecimentos

Aos revisores e editor pelas sugestões e comentários.

FIORENTIN, L. D.; MIRANDA, R. O. V.; ARCE, J. E.; FIGUEREDO FILHO, A.; TÊO, S. J.; HOINACKI, R. C. Nonlinear models applied for site classification of *Pinus elliottii* and *Pinus taeda* stands. *Rev. Bras. Biom.* Lavras, v.35, n.3, p.474-496, 2017.

- **ABSTRACT:** *The objectives of this research were to test statistical models to classify the sites of the Pinus elliottii and Pinus taeda stands, at Caçador region, Santa Catarina, Brazil, and to propose the use of the lack of fit test to evaluate the anamorphism of the site index curves. Site classification was performed by guide-curve method, for reference age of 25 years, and four nonlinear regression models were tested. The relation between dominant height and site index were evaluated by anamorphism test and lack of fit test. The models tested showed similar performance for dominant height estimates, except for Clutter and Jones model. The Bailey of 4 Parameters model showed superior fitting and precision statistics for Pinus elliottii and Pinus taeda and it was used to generate the index sites curves for both species. The anamorphism test and lack of fit test indicated anamorphic pattern for site index curves for Pinus elliottii and Pinus taeda species. The lack of fit test was appropriate to evaluate the anamorphism of the site index curves.*
- **KEYWORDS:** *Site index; anamorphism; lack of fit test*

Referências

ASSMANN, E. *Waldertragskunde*. Muenchen: BLV Verlagsgesellschaft, 1961. 435p.

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

HEINSDIJK, D.; SOARES, R. O. Plantações de coníferas no Brasil: estudo preliminar sobre volumes e rendimentos da *Araucaria angustifolia*, *Cryptomeria japonica*, *Cunninghamia lanceolata* e *Pinus elliottii*. *Serviço Forestal Brasileiro*, n.5, 1962. Boletim de Pesquisa.

DAVID, H. C.; PÉLLICO NETTO, S.; ARCE, J. E.; DALLA CORTE, A. P.; MARINHESKI FILHO, A.; BEHLING, A. Updating of dominant height growth modelling and site index of *Pinus taeda* L., in southern Brazil. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, v.9, n.2, p.115-125, 2015.

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

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

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

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

HUSCH, B.; BEERS, T. W.; KERSHAW JR., J. A. *Forest mensuration*. 4.ed. Hoboken, New Jersey, J. Wiley & Sons, 1983, 447p.

KIRBY, C. L. Site index equations for lodgepole pine and white pine in Alberta. Edmonton: Northern Forest Research Centre, 1975. 12p. (inform. Report NORX-142).

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

MACHADO, S. A. Curvas de índice de sítio para plantações de *Pinus taeda* na região central do Estado do Paraná. *Floresta*, Curitiba, v.2, n.11, p.4-18, 1980.

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

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

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

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

REGAZZI, A. J.; SILVA, C. H. O. Testes para verificar a igualdade de parâmetros e a identidade de modelos de regressão não-linear em dados de experimento com delineamento em blocos casualizados. *Revista Ceres*, Viçosa, v.57, n.3, p.315-320, 2010.

RETSLAFF, F. A. S.; FIGUEIREDO FILHO, A.; DIAS, A. N.; BERNETT, L. G.; FIGURA, M. A. Curvas de sítio e relações hipsométricas para *Eucalyptus grandis* na região de Campos Gerais, Paraná. *Cerne*, Lavras, v.21, n.2, p.219-225, 2015.

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

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

SCOLFORO, J. R. S.; MAESTRI, R.; FERRAZ FILHO, A. C.; MELLO, J. M.; OLIVEIRA, A. D.; ASSIS, A. L. Dominant height model for site classification of *Eucalyptus grandis* incorporating climatic variables. *International Journal of Forestry Research*, p.1-7, 2013.

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

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

SKOVSGAARD, J. P.; VANCLAY, J. K. Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. *Forestry*, v.81, n.1, 2007.

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

SPURR, S. H. *Forest Inventory*. New York, The Ronald Press Company. 1952.

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

Recebido em 26.02.2016

Aprovado após revisão em 11.10.2016