



## DIFERENTES ABORDAGENS PARA CLASSIFICAÇÃO DE SÍTIOS FLORESTAIS DE TECA CLONAL

Kennedy Nunes Oliveira<sup>1</sup>, Mario Lima dos Santos<sup>1</sup>, Eder Pereira Miguel<sup>1</sup>, Hallefy Junio  
de Souza<sup>1</sup>, Ruan Felipe Lima Caldeira<sup>1</sup>

1 Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil. E-mail: [kennedynuneso@gmail.com](mailto:kennedynuneso@gmail.com);  
[mariolimaeng@gmail.com](mailto:mariolimaeng@gmail.com); [miguelederpereira@gmail.com](mailto:miguelederpereira@gmail.com); [hallefyj.souza@gmail.com](mailto:hallefyj.souza@gmail.com);  
[ruanflc1@gmail.com](mailto:ruanflc1@gmail.com)

Autor correspondente: Kennedy Nunes Oliveira. E-mail: [kennedynuneso@gmail.com](mailto:kennedynuneso@gmail.com).

### RESUMO

Para modelar o crescimento e produção de povoamentos florestal, a capacidade produtiva é um dos termos mais importantes para compor variáveis de entrada. Com isto, o objetivo foi determinar e comparar a capacidade produtiva utilizando a curva guia (GC), abordagem da diferença algébrica (ADA) e abordagem da diferença algébrica generalizada (GADA) em plantações clonais de teca na Amazônia Oriental. Os modelos baseados em Chapman-Richards (GC), Lundqvist-Korf (ADA) e Lundqvist-Korf (GADA) apresentaram maior acurácia dentro de cada abordagem para estimar altura dominante, e todos foram validados. A característica polimórfica das curvas geradas pelos modelos ajustados por ADA e GADA descreveu o comportamento biológico da estatura dominante em função da idade. O método da curva guia anamórfica não foi eficiente para descrever o comportamento produtivo da teca. Com base nos resultados, recomendamos os métodos de modelagem de altura dominante para classificação de locais usando equações diferenciais, particularmente o método GADA, que forneceu curvas mais flexíveis. Portanto, este método foi capaz de retratar o polimorfismo com múltiplas assíntotas.

**Palavras-chave:** ADA; curva Guia; GADA; povoamentos; produção

## *DIFFERENT APPROACHES TO DETERMINE THE PRODUCTIVE CAPACITY OF TEAK CLONAL PLANTATIONS*

### *ABSTRACT*

*To model forest stand growth and production, productive capacity is one of the most important terms to compose input variables. With this, the objective was to determine and compare the productive capacity using the guide curve (GC), algebraic difference approach (ADA) and generalized algebraic difference approach (GADA) in clonal teak plantations in the Eastern Amazon. The Chapman-Richards (GC), Lundqvist-Korf (ADA) and Lundqvist-Korf (GADA) based models showed higher accuracy within each approach for estimating dominant height, and all were validated. The polymorphic characteristic of the curves generated by the models fitted by ADA and GADA described the biological behavior of dominant height as a function of age. The anamorphic guide curve method was not efficient to describe the productive behavior of teak. Based on the results, we recommend the dominant height modelling methods for site classification using differential equations, particularly the GADA method, which provided more flexible curves. Therefore, this method was able to portray polymorphism with multiple asymptotes.*

**Key words:** ADA; guide curve; GADA; stands; production

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MENSURAÇÃO FLORESTAL



### INTRODUÇÃO

A classificação de sítios por meio da modelagem de altura dominante ( $H_D$ ), visando determinar a capacidade produtiva de povoamentos de teca, tem sido uma das ferramentas mais promissoras para subsidiar práticas de manejo da espécie (Huy *et al.*, 2022; Souza *et al.*, 2022). A maioria das técnicas disponíveis para otimizar as curvas de índice de sítio se baseia nos seguintes métodos (Clutter *et al.*, 1983): curva-guia, previsão de parâmetros, abordagem da diferença algébrica (ADA) e abordagem da diferença algébrica generalizada (GADA).

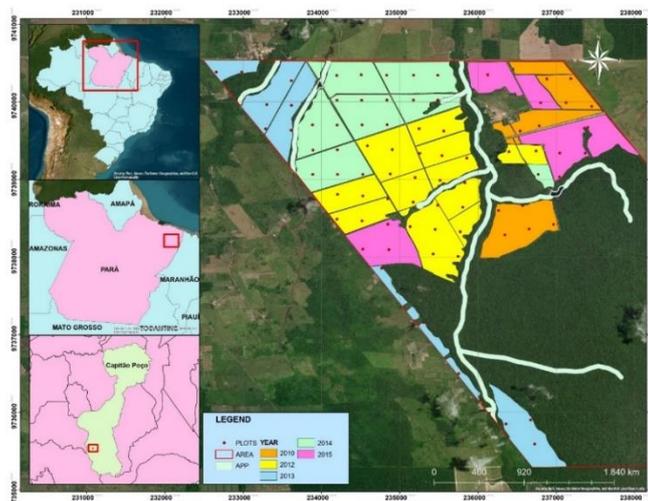
Como alternativa ao método da GC, Cieszewski & Bella (1989) propuseram um método de abordagem baseado na diferença algébrica (ADA), que consiste na derivação de equações dinâmicas, o que permite a substituição dos parâmetros da equação e a geração de curvas anamórficas ou polimórficas. As curvas polimórficas conseguem descrever o crescimento em  $H_D$  de espécies florestais folhosas como a teca, que geralmente apresentam crescimento irregular.

Neste sentido, o objetivo do estudo foi determinar e comparar a capacidade produtiva utilizando a curva guia, abordagem da diferença algébrica e abordagem da diferença algébrica generalizada dos plantios clonais de teca na Amazônia Oriental.

### MATERIAL E MÉTODOS

#### Área de estudo e práticas silviculturais

O estudo foi conduzido em plantios clonais de teca, situados no município de Capitão Poço, Pará, Amazônia Oriental, Brasil ( $2^{\circ}30' S$ ;  $47^{\circ}20' W$  e  $2^{\circ}20' S$ ;  $47^{\circ}30' W$ ) (Figura 1).



**Figura 1.** Localização da área de estudo situada no município de Capitão Poço, Pará, Amazônia Oriental, Brasil

Os solos predominantes são o Latossolo Amarelo Distrófico Petroplúntico; Latossolo Amarelo Distrófico Típico (Embrapa, 2018). O clima é identificado como *Am* de acordo com a classificação de Köppen e caracteriza-se como quente e úmido, com curta estação seca (Alvares *et al.*, 2013). A pluviosidade e a temperatura média anual são de 2.256 mm e 26,1 °C, respectivamente (INMET, 2020). Os povoamentos monoclonais de teca possuem idades entre 7 e 12 anos e foram plantados manualmente nos espaçamentos de 3,5 m × 3,5 m, 3,75 m × 3,75 m

e 4 m × 4 m. Os desbastes foram realizados aos 4,5 (1º) e 8,5 (2º) anos, reduzindo a área basal em 50% em ambas as intervenções (Santos *et al.*, 2022).

**Inventário florestal**

Foram realizados inventários periódicos durante dez anos em 58 parcelas circulares (500 m²), utilizando o processo de amostragem sistemático, cujas parcelas foram distribuídas em um grid regular de 320 m x 320 m (Figura 1). As variáveis medidas foram: diâmetro à 1,3 m do solo (D) medido com fita diamétrica e altura total (h) com hipsômetro Vertex IV. A altura dominante (H<sub>D</sub>) foi determinada de acordo com critério estabelecido por Assmann (1970).

**Modelagem da capacidade produtiva**

Os índices de sítio (SI) foram obtidos utilizando as abordagens da curva-guia (CG), abordagem da diferença algébrica (ADA) e da diferença algébrica generalizada (GADA). A modelagem da H<sub>D</sub> pela abordagem CG foi realizada utilizando modelos biológicos tradicionais (Chapman-Richards e Gompertz) (Tabela 1), ajustados a pares de H<sub>D</sub> -idade, como modelos candidatos para construção de curvas anamórficas (Clutter *et al.*, 1983). Para abordagem de ADA e GADA, selecionou-se três modelos dinâmicos, sendo de Lundqvist-Korf e Chapman-Richards (Cieszewski, 2001), ajustados a pares de dados de H<sub>D</sub> atual (Y<sub>0</sub>) em função da idade atual (t<sub>0</sub>) e H<sub>D</sub> futura (Y) em função da idade futura (t<sub>1</sub>).

**Tabela 1.** Modelos de crescimento em altura dominante selecionados para ajuste aos dados dos plantios clonais de teca na Amazônia Oriental, Brasil

Modelo Base	Parâmetros relacionados à variável teórica X	Solução inicial para X com Y <sub>0</sub> e t <sub>0</sub>	Equação dinâmica
<b>Curva-guia</b>			
Chapman-Richards $Y = A [1 - \exp(-B t)]^\Gamma$	-	-	$Y = \frac{Y_0}{[1 - \exp(-B t_0)]^\Gamma} [1 - \exp(-B t_1)]^\Gamma$
Gompertz $Y = A \exp(-\exp(B - \Gamma t))$	-	-	$Y = \frac{Y_0}{\exp(-\exp(B \Gamma t_0))} \exp(-\exp(B \Gamma t_1))$
<b>ADA</b>			
Lundqvist-Korf $Y = A \exp(-B t^{-\Gamma})$	B = X	$X_0 = -\ln \left( \frac{Y_0}{b_1} \right) t_0^{b_3}$	$Y = b_1 \exp \left[ \ln \left( \frac{Y_0}{b_1} \right) \left( \frac{t_0}{t_1} \right)^{b_3} \right]$
Chapman-Richards $Y = A [1 - \exp(-B t)]^\Gamma$	A = X	$X_0 = \frac{Y_0}{[1 - \exp(-b_1 t_0)]^{b_2}}$	$Y = Y_0 \left[ \frac{1 - \exp(-b_1 t_1)}{1 - \exp(-b_1 t_0)} \right]^{b_2}$
<b>GADA</b>			
Lundqvist-Korf $Y = A \exp(-B t^{-\Gamma})$	$A = \exp(X)$ $B = b_1 + \frac{b_2}{X}$	$X_0 = \frac{1}{2} t_0^{-b_3} \left[ b_1 + t_0^{b_3} \ln(Y_0) \pm \sqrt{4b_2 t_0^{b_3} + L_0} \right]$ Com, $L_0 = (-b_1 - t_0^{b_3} \ln(Y_0))^2$	$Y = \exp(X_0) \exp \left[ -\left( \frac{b_1 + b_2}{X_0} \right) t_1^{-b_3} \right]$
Cieszewski $Y = \frac{B t^\Gamma}{t^\Gamma + A}$	$A = B + X$ $B = \frac{A}{X}$	$X_0 = h_0 - b_1 + \sqrt{(h_0 - b_1)^2 + 2 h_0 \exp \left( \frac{b_1}{t_0^{b_3}} \right)}$	$Y = Y_0 \left[ \frac{t_1^{b_3} (t_0^{b_3} X_0 \exp(b_2))}{t_0^{b_3} (t_1^{b_3} X_0 \exp(b_2))} \right]$

Em que: Y e Y<sub>0</sub>: variáveis de interesse na idade t<sub>0</sub> e t<sub>1</sub>, respectivamente; t, t<sub>0</sub> e t<sub>1</sub>: idades do povoamento (meses); X: variável teórica não observável e não quantificável; X<sub>0</sub>: solução de X para altura e idade iniciais; A, B e Γ: parâmetros do modelo base; b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub> e b<sub>3</sub>: parâmetros globais das equações dinâmicas. Fonte: Cieszewski (2001); Cieszewski & Strub (2008); Burkhart & Tomé (2012)

**Seleção e validação dos modelos**

Para cada abordagem, foi selecionado o modelo que apresentou maior precisão, comportamento lógico e realismo biológico nas curvas de crescimento em altura dominante, avaliando o ponto de inflexão, taxa de crescimento e ponto assintótico. A seleção obedeceu aos

## VI Encontro Brasileiro de Mensuração Florestal

seguintes critérios estatísticos: maior coeficiente de correlação linear de Pearson entre os valores observados e preditos ( $r_{\hat{y}y}$ ), menor valor da raiz quadrada do erro médio (RMSE), menor raiz quadrada do erro médio percentual (RMSPE), menor critério de informação de Akaike (AIC). Os ajustes dos modelos de crescimento em  $H_D$  foram realizados utilizando o método dos mínimos quadrados - não linear generalizado, a partir da função “*gnls*” do pacote ‘*nlme*’ do software R® studio (R Core Team, 2021).

O banco de dados da altura dominante foi dividido em dois grupos aleatórios, contemplando todas as idades, sendo um grupo para ajuste dos modelos (80%) e outro para validação dos mesmos (20%). Para validação dos modelos selecionados, adotou-se o teste de equivalência TOST (*two one-sided test*) baseado em regressão usando *bootstrap*, sendo este um dos métodos mais adequados para avaliar a equivalência entre os valores estimados e observados.

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo M3 apresentou a maior acurácia em cada abordagem para prever a altura dominante de acordo com os critérios estatísticos, com erros de estimativa menores que um metro (Tabela 2). O contrário ocorreu com os modelos de abordagem GC (M1 e M2), com erros de estimação superiores a um metro. Selecionamos o M3 para gerar as curvas de índice do sítio usando essa abordagem.

**Tabela 2.** Estimadores e estatísticas de precisão de modelos de crescimento em altura dominante ajustados pelas abordagens de CG, ADA e GADA, dos plantios clonais de teca na Amazônia Oriental, Brasil

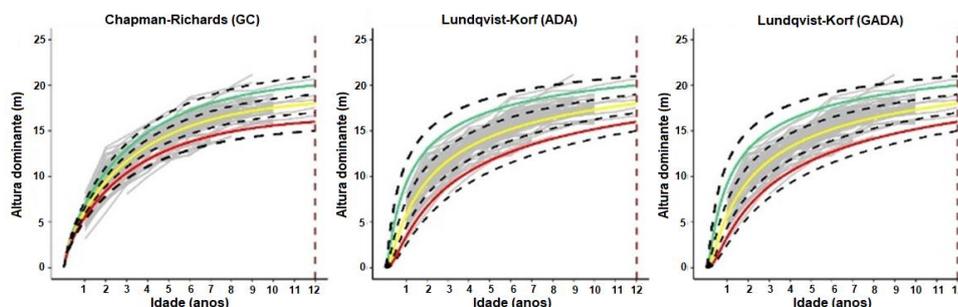
#	Modelo base	Coefficientes	Erro padrão dos coeficientes Guide-curve (CG)	$r_{\hat{y}y}$	RMSE	RMSPE	AIC
M1	Chapman-Richards	$b_0 = 18,728208$	0,3276571	0,9297	1,2856	9,2918	1170,18
		$b_1 = 0,020313$	0,0014875				
		$b_2 = 0,718371$	0,0342760				
M2	Logistic	$b_0 = 17,457517$	0,20629901	0,9239	1,3369	9,6626	1268,77
		$b_1 = 2,697438$	0,12125538				
		$b_2 = 0,045510$	0,00158147				
<b>Abordagem da diferença algébrica (ADA)</b>							
M3	Lundqvist-Korf	$b_1 = 24,958604$	1,2115007	0,9678	0,6683	4,5251	875,63
M4	Chapman-Richards	$b_3 = 0,605413$	0,0382228	0,9596	0,7687	5,2047	995,12
		$b_1 = 0,0232586$	0,00201532				
		$b_2 = 0,7577856$	0,03424046				
<b>Abordagem da diferença algébrica generalizada (GADA)</b>							
M5	Lundqvist-Korf	$b_1 = -30115,79$	8546,636	0,9677	0,6684	4,5254	877,69
		$b_2 = 96856,30$	27443,282				
		$b_3 = 0,61$	0,039				
M6	Cieszewski	$b_1 = 10,707307$	3,184992	0,9648	0,7029	4,7595	920,76
		$b_2 = 5,031924$	0,507783				
		$b_3 = 0,751607$	0,026144				

Em que:  $b_i$  = parâmetros do modelo; RMSE = raiz quadrada do erro médio; RMSPE = raiz quadrada do erro médio percentual;  $r_{\hat{y}y}$  = coeficiente de correlação entre valores observados e preditos e; AIC = Critério de Informação de Akaike

A característica polimórfica das curvas geradas pelos modelos ajustados ADA e GADA descreve um comportamento biológico realista da altura dominante ao longo de toda a curva, com pontos reais da variável quase inteiramente dentro dos limites de classe. A abordagem ADA se destaca por apresentar maior precisão, além de apresentar maior simplicidade de aplicação do que

a abordagem GADA. A abordagem GC não foi eficiente para descrever o comportamento produtivo da teca.

As curvas de índice de sítio geradas por cada abordagem demonstraram que existem locais com características produtivas distintas, repercutindo na diferença de potencial produtivo, representada pelos índices de sítio de 16, 18 e 20 m (Figura 3).



**Figura 3.** Curvas de índice de sítio geradas pelas abordagens de CG, ADA e GADA em plantios clonais de teca na Amazônia Oriental, Brasil

### CONCLUSÃO

Para os povoamentos clonais de *Tectona grandis* L.f. (Lamiaceae) na Amazônia Oriental, as abordagens que utilizam equações dinâmicas para classificação de sítios são mais acuradas. A curva guia não se mostrou indicada para prescrever a capacidade produtiva. Com isto, recomenda-se o emprego das abordagens de ADA e GADA, sendo esta última a que apresenta maior precisão nas estimativas de altura dominante.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvares, C. A.; Stape, J. L.; Sentelhas, P. C.; De Moraes Gonçalves, J. L.; Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p.711–728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- Assmann, E. **The principles of forest yield study: Studies in the organic production, structure, increment, and yield of forest stands**. Oxford: Pergamon Press, 1970. 506p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-01587-3>.
- Burkhart, H. E.; Tomé, M. **Modeling forest trees and stands**. Dordrecht: Springer, 2012. 458p. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3170-9>.
- Cieszewski, C.J. Three methods of deriving advanced dynamic site equations demonstrated on inland Douglas-fir site curves. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 31, n. 1, p.165–173, 2001. <https://doi.org/10.1139/x00-132>.
- Cieszewski, C. J.; Bella, I. E. Polymorphic height and site index curves for lodgepole pine in Alberta. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 19, n. 9, p.1151–1160, 1989. <https://doi.org/10.1139/x89-174>.
- Cieszewski, C.J.; Strub, M. Generalized algebraic difference approach derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes from exponential and logarithmic functions. **Forest Science**, v. 54, n. 3, p.303–315, 2008. <https://doi.org/10.1093/forests/54.3.303>.
- Clutter, J. L.; Fortson, J. C.; Pienaar, L. V.; Brister, G. H.; Bailey, R. L. **Timber management: a quantitative approach**. New York: Wiley, 1983. 333p.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5.ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2018. 356p.
- Huy, B.; Truong, N. Q.; Khiem, N. Q.; Poudel, K. P.; Temesgen, H. Stand growth modeling system for planted teak (*Tectona grandis* L.f.) in tropical highlands. **Trees, Forests and People**, v. 9, e100308, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100308>.
- Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. **Banco de Dados Meteorológicos - BDMEP**. 2020. Disponível em: <https://mapas.inmet.gov.br/>. Acesso em: 13 Mar. 2023.

## VI Encontro Brasileiro de Mensuração Florestal

R Core Team. **R**: a language and environment for statistical computing. Vienna: R foundation for statistical computing, 2021.

Santos, M. L.; Miguel, E. P.; Santos, C. R. C.; Souza, H. J.; Martins, W. B. R.; Lima, M. D. R.; Arce, J. E.; Silva, J. N. M. Forecasting production in thinned clonal stands of *Tectona grandis* in Eastern Amazonia. **Forest Systems**, v. 31, n. 3, e024, 2022. <https://doi.org/10.5424/fs/2022313-19379>.

Souza, H. J.; Miguel, E. P.; Nascimento, R. G. M.; Cabacinha, C. D.; Rezende, A. V.; Santos, M. L. Thinning-response modifier term in growth models: An application on clonal *Tectona grandis* Linn F. stands at the amazonian region. **Forest Ecology and Management**, v. 511, e120109, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120109>.