



## Influência da variabilidade edafoclimática no crescimento de clones de eucalipto no Nordeste baiano

Ana Carolina Albuquerque Santos<sup>1</sup>, Simone Silva<sup>1\*</sup>, Helio Garcia Leite<sup>1</sup>, Jeovane Pereira da Cruz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Viçosa, Av. Ph Rolfs, Centro, CEP 36570-000, Viçosa, MG, Brasil

<sup>2</sup>Copener Florestal, R. Treze de Julho, Jardim Petrolar, CEP 48030-660, Alagoinhas, BA, Brasil

\*Autor correspondente:  
[simone.silva.ufv@gmail.com](mailto:simone.silva.ufv@gmail.com)

### Termos para indexação:

Modelo de Gompertz  
Modificação  
Previsão

### Index terms:

Gompertz model  
Modification  
Forecasting

Recebido em 29/03/2016  
Aprovado em 06/09/2017  
Publicado em 29/09/2017

doi: 10.4336/2017.pfb.37.91.1207

**Resumo** - Objetivou-se estudar o crescimento de três clones de eucalipto em diferentes tipos de solos e do histórico de precipitação pluviométrica (PP) na região nordeste da Bahia. Para isso, utilizaram-se dados de parcelas permanentes medidas em povoamentos clonais de eucalipto em Argiloso Amarelo, Argissolo, Vermelho-Amarelo, Latossolo Amarelo e Neossolo Quartzarênico, com e precipitação média anual variando de 700 mm a 1700 mm. Foram ajustados modelos de crescimento em função da idade para altura dominante, diâmetro quadrático, área basal e volume por ha para cada combinação de clone e solo. Para analisar o efeito da PP na predição do volume, foi incluído um modificador associado à precipitação no modelo de Gompertz. O maior crescimento no Argissolo Amarelo foi obtido pelo clone 1. O modelo ajustado, com a inclusão da PP, reduziu os erros em torno de 62,9%. em comparação com o modelo biológico tradicional. Concluiu-se que a consideração da variabilidade dos solos e da PP na modelagem de crescimento em regiões com ampla variabilidade da PP, afetou a exatidão das estimativas. E, ainda, a análise das curvas de crescimento em diferentes solos e PP auxilia na definição do clone adequado para locais onde não há informações de inventário.

## Influence of soil and climate variability in the growth of eucalyptus clones in Bahia Northeast

**Abstract** - The objective was to study the growth of three eucalypts clones in different soil types and precipitation (PP) history in Northeastern of Bahia. We used data from permanent plots measured in eucalypts clonal stands in Paleudult, Haplorthox and Quartzipsamment. The average annual PP ranged from 700 mm to 1700 mm. Growth models were adjusted for age at dominant height, quadratic diameter, basal area and volume per ha for each combination of clone and soil. To analyze the effect of precipitation PP in volume prediction we included a modifier associated with PP in Gompertz model. The highest growth in the Paleudult was obtained by clone 1. The adjusted model, which included PP, reduced errors around 62.9% compared with traditional biological model. We concluded that considering soil and PP variability in growth models in areas with wide variability of PP affected the accuracy of the estimates. Moreover, the analysis of growth curves in different soils and PP helps define the appropriate clone for sites where there is no inventory information.

## Introdução

As excelentes condições edafoclimáticas aliadas à tecnologia e manejo adequado conferem a Bahia plantios com a maior produtividade do mundo, atingindo  $65 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  em alguns locais. Esses fatores vêm determinando a expansão de plantações de eucalipto em diversas regiões do Estado (Indústria Brasileira de Árvores, 2015).

A região Nordeste da Bahia abrange ampla variação de solo e clima, o que determina a ampla variabilidade na produtividade florestal (Gonçalves et al., 2014). Em alguns locais dessa região a textura do solo e, principalmente, a precipitação pluviométrica têm sido apontadas como fatores limitantes do potencial produtivo do eucalipto (Stape, 2002; Stape et al. 2004; Gonçalves et al., 2014).

A escolha da área para se implantar determinada cultura depende primordialmente da capacidade do solo em oferecer as condições adequadas para o seu crescimento (Carvalho et al., 1999). A expansão de plantios florestais em locais onde o potencial produtivo é desconhecido gera incertezas quanto à produção esperada. O estudo das tendências de crescimento de clones de eucalipto em diferentes tipos de solo e sobre a variação do regime hídrico é importante no sentido de auxiliar a tomada de decisão quanto aos locais onde há pouco conhecimento sobre adaptação e desempenho das espécies florestais a serem plantadas.

No contexto das mudanças climáticas, os Estados da região do Nordeste poderão sofrer impactos significativos na produção agrícola, sendo esses potencializados por eventos climáticos extremos, como longos períodos de seca (Araújo et al., 2014). Estudos sobre os possíveis impactos das alterações no regime de chuvas no crescimento dos plantios clonais são fundamentais para o planejamento dos futuros plantios florestais (Soares & Leite, 2000). O setor florestal pode ser um dos mais afetados pelas mudanças climáticas, uma vez que, mesmo com todos os avanços tecnológicos as condições ambientais ainda são fatores determinantes para a produtividade (Perez-Garcia et al., 2002; Baesso et al., 2010). Em plantios florestais a redução da disponibilidade de água nos períodos iniciais de crescimento pode ocasionar grandes perdas na produção de madeira (Flexas et al., 2002).

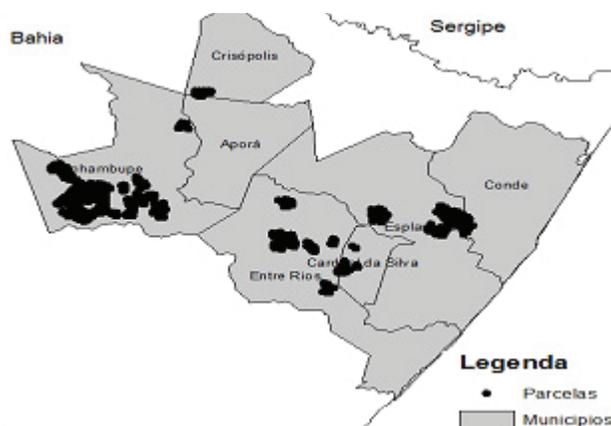
Os modelos de crescimento estimam a produtividade de madeira dos plantios, dependendo das condições edafoclimáticas em relação ao potencial genético de

cada material (Campos & Leite, 2013). Ao associá-los a variáveis climáticas, estes podem ser úteis para identificar riscos da produtividade futura das florestas, projetando anualmente o crescimento do povoamento sob o efeito da precipitação pluviométrica. Alguns trabalhos estimaram a área basal (Snowdon et al., 1998, 1999; Soares & Leite, 2000) ou produção volumétrica de madeira diretamente, considerando as características ambientais na formulação do modelo (Zamin et al., 2013). Com essa inclusão, os modelos permitem gerar diferentes cenários de produção volumétrica (Soares & Leite, 2000). Assim, as informações obtidas podem ser utilizadas para mitigar os efeitos das mudanças das distribuições das chuvas e avaliar o potencial de adaptação dos plantios.

É inquestionável a importância de se obter equações para as diferentes condições edafoclimáticas presentes no Nordeste da Bahia e, também, para avaliação do impacto das alterações do regime de chuvas na produtividade da região. Neste cenário, o objetivo deste trabalho foi estudar o crescimento de três clones de eucalipto, em diferentes tipos de solos e de precipitação pluviométrica, na região nordeste da Bahia.

## Material e métodos

Os dados foram obtidos de uma rede de parcelas permanentes instaladas e medidas em povoamentos de três clones de eucalipto, nos solos: Argiloso Amarelo, Argilossolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Amarelo e Neossolo Quartzarênico. As áreas amostradas contemplam locais com precipitação média anual, durante o período de rotação, variando de 700 a 1700 mm (Figura 1).



**Figura 1.** Mapa de localização das parcelas amostradas no Nordeste da Bahia.

O histórico da precipitação pluviométrica foi obtido em estações meteorológicas pertencentes ao Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica. Para associar as parcelas a cada estação meteorológica,

foram feitas interpolações utilizando a metodologia de Thiessen (1911). As 1.748 parcelas permanentes, com área média de 400 m<sup>2</sup>, foram medidas anualmente, de 2007 a 2011 (Tabela 1).

**Tabela 1.** Valores mínimo e máximo de características observadas no banco de dados de modelagem.

Clone	Grupo de solos	Classe de idade (anos)	Altura dominante (m)		Altura total (m)		Diâmetro médio (cm)		Área basal (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )		Volume (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )		Amplitude de precipitação	Casos
			Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx		
1	Argissolo Amarelo	1	11,1	11,7	10,1	10,6	8,4	8,7	5,14	6,19	25,27	31,94	1300 - 1300	2
		2	8,3	21,1	7,3	19,9	6,5	13,9	2,93	16,19	10,74	143,06	900 - 1700	98
		3	11,0	27,0	10,7	26,0	8,6	16,0	5,87	21,13	31,92	247,53	900 - 1700	235
		4	16,9	31,1	13,9	27,8	9,8	17,2	9,19	24,41	73,52	272,14	900 - 1800	246
		5	18,0	32,4	17,0	30,5	12,2	19,0	10,21	30,59	88,10	374,91	900 - 1800	168
		6	19,8	35,4	18,0	33,5	13,3	18,9	14,58	27,97	124,48	393,10	900 - 1800	69
		7	22,5	33,6	21,0	29,2	14,3	20,3	11,44	30,71	121,82	377,29	1300 - 1800	8
2	Argissolo Amarelo	2	11,4	23,9	10,7	22,2	7,5	13,7	4,56	14,22	25,71	129,49	900 - 1700	90
		3	12,7	26,0	12,3	24,1	9,1	16,2	6,73	20,31	40,39	207,68	900 - 1800	238
		4	15,3	28,5	13,6	26,0	10,4	17,3	8,88	20,33	57,54	242,84	900 - 1700	125
		5	16,8	30,0	16,2	28,8	11,1	18,3	11,31	22,38	87,05	246,89	900 - 1700	111
		6	20,2	29,9	19,7	27,5	12,2	16,8	12,55	21,26	116,45	259,64	900 - 1700	22
3	Argissolo Amarelo	1	10,5	10,5	9,6	9,6	8,4	8,4	6,17	6,17	28,71	28,71	1400 - 1400	1
		2	6,7	21,8	6,3	19,8	6,1	14,7	2,39	18,70	7,93	167,75	700 - 1700	681
		3	11,8	26,0	10,8	24,0	8,7	16,3	4,35	21,81	25,57	241,07	700 - 1800	904
		4	13,5	31,0	12,8	29,3	9,8	17,3	6,01	25,38	41,07	337,70	800 - 1700	849
		5	16,9	36,4	11,5	32,5	10,6	18,1	7,32	26,14	60,71	357,51	800 - 1800	550
		6	19,8	36,0	18,7	31,9	12,3	18,7	8,97	24,72	85,59	355,38	900 - 1800	133
		7	27,6	27,6	24,6	25,0	17,7	17,7	26,19	27,28	293,32	305,91	1300 - 1300	2
3	Argissolo Vermelho Amarelo	2	9,3	18,3	8,9	17,1	7,4	12,9	4,18	12,72	18,15	97,32	800 - 1700	188
		3	12,7	24,5	12,2	20,6	9,7	14,6	7,40	16,68	43,70	152,51	800 - 1700	214
		4	15,7	29,6	15,1	25,2	10,7	15,8	7,97	17,88	64,80	206,62	800 - 1700	192
		5	19,1	31,0	17,9	27,6	11,6	16,5	10,00	19,97	93,31	216,67	900 - 1800	114
		5	14,4	28,2	12,8	25,6	11,4	17,2	6,06	18,35	37,74	198,92	800 - 1400	206
3	Latossolo Amarelo	2	6,7	18,9	6,1	16,2	5,9	12,6	2,32	13,99	7,48	99,07	700 - 1100	444
		3	9,9	21,6	9,5	20,2	8,7	15,2	4,02	16,66	18,78	143,82	700 - 1400	486
		4	12,8	26,2	12,2	24,5	10,1	17,0	4,48	18,74	25,15	194,07	700 - 1400	417
		5	14,4	28,2	12,8	25,6	11,4	17,2	6,06	18,35	37,74	198,92	800 - 1400	206
		5	18,7	32,1	17,3	28,8	12,4	17,3	10,93	19,96	89,83	237,65	800 - 1700	93
3	Neossolo Quartzarênico	2	7,4	21,0	6,8	17,9	6,3	12,9	2,67	14,20	9,83	109,83	800 - 1700	105
		3	13,0	25,1	11,6	22,7	9,1	14,8	5,48	17,53	31,68	169,91	800 - 1700	140
		4	16,2	29,0	15,3	25,5	10,2	15,5	8,30	17,73	61,45	191,89	800 - 1700	108
5	18,7	32,1	17,3	28,8	12,4	17,3	10,93	19,96	89,83	237,65	800 - 1700	93		

### Modelagem independente da precipitação pluviométrica

Para a estimação das características altura dominante ( $H_d$ ), diâmetro médio ( $q$ ), área basal ( $B$ ) e volume com casca ( $V$ ), em função da idade, foram testados os modelos apresentados na tabela 2.

Os ajustes foram feitos para seis estratos, definidos pelas combinações de clone e classe de solo. A seleção do melhor modelo para cada característica e estrato foi feita com base na distribuição dos erros relativos (ER%), no Bias e pelo critério de Akaike (AIC), de acordo com (Gujarati & Porter, 2011), conforme equações 1, 2 e 3, respectivamente.

**Tabela 2.** Modelos testados para estimação das características de crescimento em função da idade.

Modelo	Equação
Exponencial	$\hat{Y}_i = \hat{\beta}_0 e^{-\hat{\beta}_1 I_i^{-1}} + \varepsilon_i$
Logístico	$\hat{Y}_i = \frac{\hat{\beta}_1}{1 + \hat{\beta}_1 e^{\hat{\beta}_2 I_i}} \varepsilon$
Richards	$\hat{Y}_i = \frac{\hat{\beta}_0}{(1 + e^{\hat{\beta}_1 \hat{\beta}_2 I_i})^{1/\beta_3}} \varepsilon_i$
Gompertz	$\hat{Y}_i = \hat{\beta}_0 e^{e^{\hat{\beta}_1 - \hat{\beta}_2 I_i}} + \varepsilon_i$
Weibull	$\hat{Y}_i = \hat{\beta}_2 I_i^{\hat{\beta}_2 - 1} \hat{\beta}_1 \hat{\beta}_2 e^{-\left(\frac{I_i}{\hat{\beta}_1}\right)}$
Korf	$\hat{Y}_i = \hat{\beta}_0 e^{\hat{\beta}_1 I_i^{\hat{\beta}_2}} + \varepsilon_i$
Hossfeld	$\hat{Y}_i = I_i^{\hat{\beta}_2} \left( \hat{\beta}_1 + I_i \hat{\beta}_2 \hat{\beta}_0^{-1} \right) + \varepsilon_i$
MMF	$\hat{Y}_i = \frac{\beta_0 \hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 I_i^{\hat{\beta}_2}}{\hat{\beta}_1 + I_i^{\hat{\beta}_2}}$

Em que:  $\hat{Y}_i$  valor estimado,  $\hat{\beta}_n$  - Coeficientes da regressão,  $I_i$  - idade e  $\varepsilon_i$  - erro aleatório.

$$\text{Bias} = n^{-1} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i) \quad (1)$$

$$\text{ER \%} = 100 \left( \frac{\hat{Y}_1 - Y_1}{Y_1} \right) \quad (2)$$

$$\text{Ln AICE} = \frac{2k}{n} + \text{Ln} \frac{\text{RSS}}{n} \quad (3)$$

Em que:  $\hat{Y}_m$  é a média das estimativas de  $Y$ ,  $\bar{Y}$  é a média aritmética de  $Y$ ,  $k$  é o número de parâmetros do modelo,  $n$  é o número de observações e  $\text{RSS}$  é a soma de quadrados dos resíduos.

Com base nas avaliações, foi selecionado o modelo exponencial para as características Hd, q e B e o modelo Gompertz para volume. As equações estimadas com esses modelos, para cada combinação de clone e tipo de solo e para cada característica, foram comparadas

empregando-se o teste de identidade de modelos (Graybill, 1976).

### Inclusão da precipitação pluviométrica no modelo de produção

O modelo Gompertz foi ajustado para cada combinação de clone, tipo de solo e classe de precipitação pluviométrica (PP). Em seguida, foi avaliada a correlação entre as estimativas dos três parâmetros desse modelo com PP, sendo observada associação linear significativa apenas entre os valores assintóticos (a) e PP. Assim, foram definidos dois modelos (equações 4 e 5).

$$\hat{Y} = \hat{\phi}_1 \text{PP} e^{-e^{\hat{\phi}_2 - \hat{\phi}_3 I}} + \varepsilon \quad (4)$$

$$\hat{Y} = \frac{\hat{\alpha}}{\hat{\phi}_1 + \hat{\phi}_1 \text{PP}} \text{PP} e^{-e^{\hat{\phi}_2 - \hat{\phi}_3 I}} + \varepsilon \quad (5)$$

Em que:  $\hat{Y}$  - Volume estimado,  $\hat{\phi}_n$  - Parâmetros da regressão,  $I$  - idade, PP - Precipitação pluviométrica.

Este segundo modelo (equação 5) foi empregado por Temps (2005), para estimação da altura dominante de povoamentos de eucalipto.

Os modelos (equações 4 e 5) foram ajustados aos dados agrupados dos clones e solo, pelo método de Levenberg Marquardt, utilizando o software Statistica (Statsoft Inc, 2016). Com base na análise gráfica dos erros relativos percentuais (ER%) e nas correlações entre volumes observados e correspondentes volumes estimados, foi selecionado o modelo 1 (equação 4). Esse modelo foi então ajustado por combinação de clone e solo. A análise foi feita para verificar o efeito do solo na curva de produção, para cada clone, bem como para avaliar o comportamento dos três clones em uma mesma classe de solo.

As curvas de produção obtidas com a inclusão da precipitação no modelo Gompertz foram comparadas com aquelas obtidas sem a inclusão de PP. Esta comparação foi feita pela aplicação do teste de identidade de modelos (Graybill, 1976). Com o objetivo de verificar a precisão das estimativas obtidas pelas duas abordagens para a modelagem do volume. O erro padrão da estimativa relativo foi calculado para cada alternativa.

Os modelos ajustados para cada estrato com e sem o modificador dos parâmetros foram utilizados para projetar o volume até 96 meses. A partir dessas projeções, foram calculados o incremento médio anual (IMA) e o incremento corrente anual (ICA). A idade técnica de corte (ITC) foi calculada com interseção das curvas do IMA e ICA, conforme Campos & Leite (2013).

## Resultados e discussão

### Crescimento em altura, diâmetro, área basal e volume de madeira

As equações obtidas estimaram com exatidão e consistência a altura dominante, o diâmetro quadrático, a área basal e volume de madeira para todas as combinações de clone e solo (Tabela 3). Na Figura 2, são apresentadas as curvas de crescimento em altura dominante, diâmetro médio, área basal e volume de madeira para o clone 3 em diferentes solos e os clones 1, 2 e 3 no Argissolo Amarelo.

O rendimento máximo foi fixado nas equações para cada solo e precipitação (tabela 3, figura 2), permitindo uma melhor tomada de decisão em locais onde não há informações sobre a produtividade do eucalipto. Essa estratificação permite verificar de forma clara a influência do sítio nas formas das curvas das variáveis dendrométricas (Turvey, 1983).

**Tabela 3.** Estimativas dos parâmetros do modelo exponencial ajustado para altura dominante, diâmetro médio, área basal e do modelo de Gompertz ajustado para estimativa do volume de madeira, para três clones de eucalipto em quatro tipos de solos, na região Nordeste da Bahia.

Clone	Solo	Y = Altura dominante (m)		Y = Diâmetro médio (cm)		Y = Área basal (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )		Y = volumeVolume (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )			AIC	Bias
		$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$		
1	Argissolo Amarelo	-22,1070	3,5981	-16,1282	2,9915	-31,0634	3,4406	291,1172	1,4391	0,0411	7,49	0,14
2	Argissolo Amarelo	-16,5728	3,0046	-12,4136	2,8426	-23,6561	3,1583	195,7017	1,1993	0,0449	6,65	57,87
3	Argissolo Amarelo	-24,7238	3,6618	-14,9245	2,9293	-27,9088	3,2432	237,6703	1,4923	0,0449	7,51	27,27
3	Argissolo Vermelho-Amarelo	-23,7151	3,3931	-14,4476	2,8577	-28,1352	3,1568	209,3699	1,4626	0,0424	6,32	38,12
3	Latossolo Amarelo	-24,5522	2,9998	-17,4686	2,9000	-32,6866	3,1130	126,2350	1,6669	0,0599	6,58	96,62
3	Neo Quartzarênico	-27,0973	3,7422	-16,3166	2,9209	-33,3725	3,2985	268,0720	1,4199	0,0350	6,78	9,29

Em que:  $\beta_n$  - coeficientes da regressão, AIC - critério de Akaike e Bias.

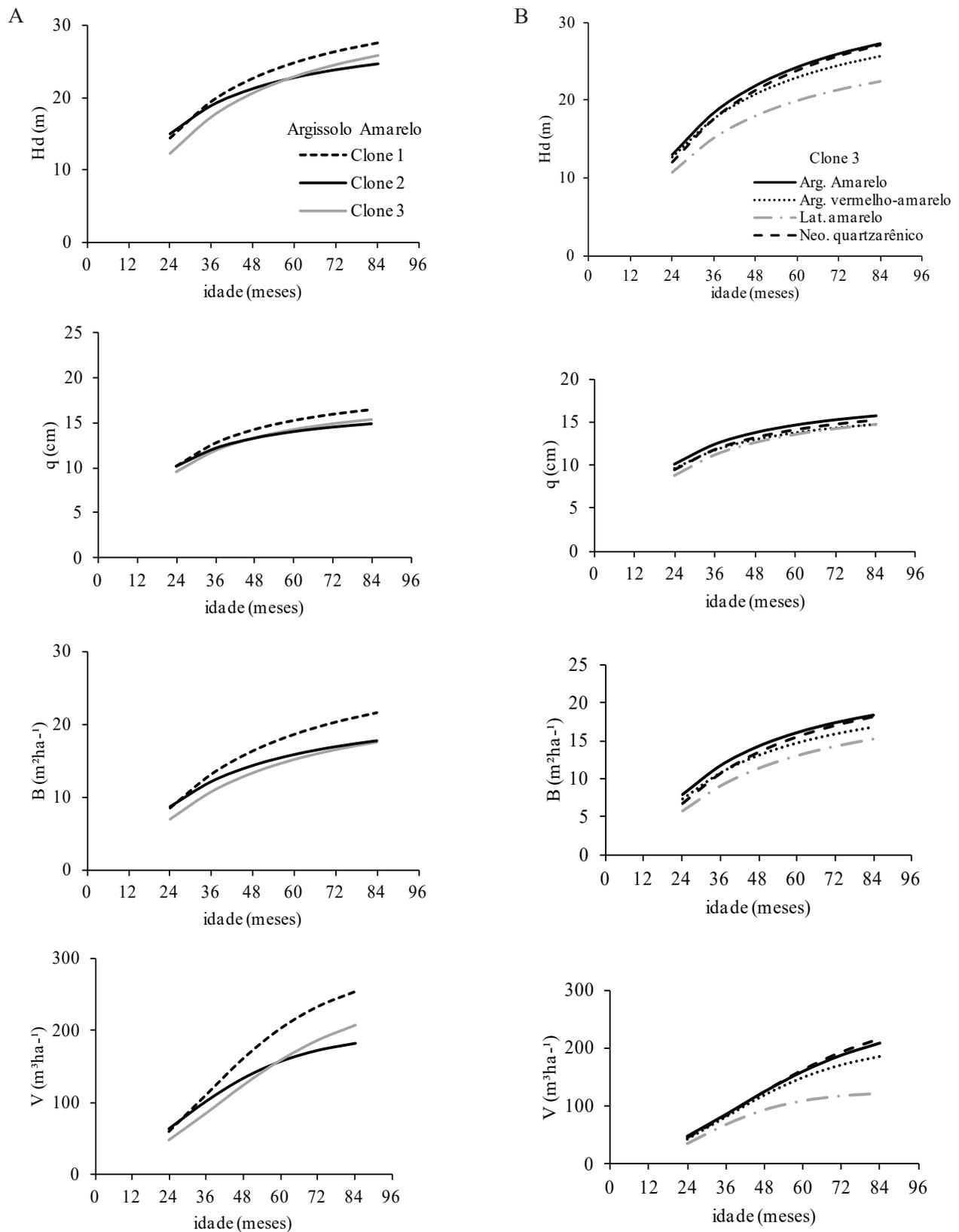
### Inclusão da precipitação pluviométrica no modelo de produção

As estimativas dos parâmetros do modelo de Gompertz modificado com a inclusão da precipitação pluviométrica (PP) para cada estrato estão apresentadas na Tabela 4. Na Figura 3 estão plotadas as curvas de produção em volume, utilizando o modelo modificado (com inclusão da precipitação) para os três clones no Argissolo Amarelo e do clone 3 em diferentes condições edáficas. O modelo ajustado permite estimar para as

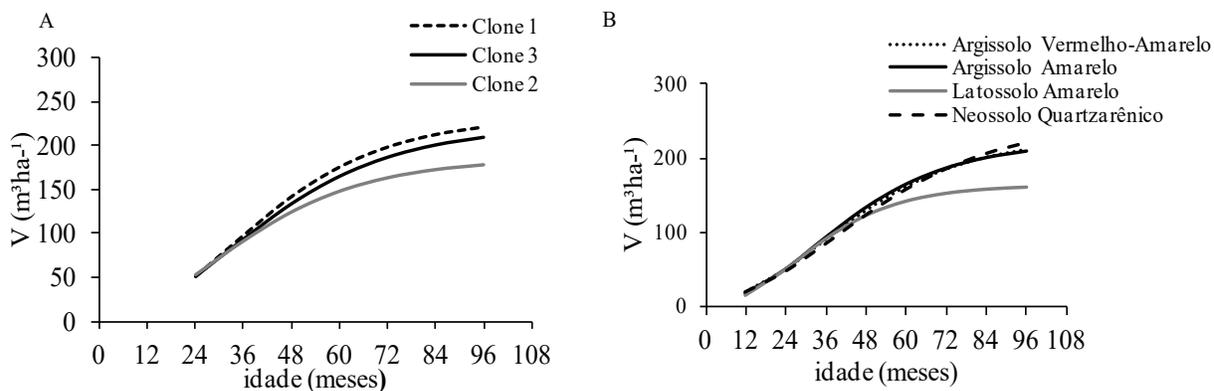
A maior média do crescimento para o clone 3 aos 84 meses foi obtida no Argissolo Amarelo, seguido do Argissolo Vermelho-Amarelo e Neossolo Quartzarênico, nos quais os crescimentos médios obtidos foram estatisticamente semelhantes (Figura 2a). O menor crescimento observado foi obtido no Latossolo Amarelo.

Stape (2002) estudou os efeitos do preparo dos solos (Latossolo e Argissolo) na produtividade de plantios de eucalipto, com 12 meses de idade, situados no Nordeste da Bahia. O autor verificou que o maior crescimento em altura nos plantios sem fertilização, aos 12 meses, ocorreu em Argissolos Amarelos. Nos Latossolos foram obtidos os menores crescimentos. Os resultados para os plantios jovens no Nordeste da Bahia obtidos por Stape (2002) corroboram com resultados das projeções de crescimento do clone 3 aos 84 meses em diferentes solos (Figura 2a).

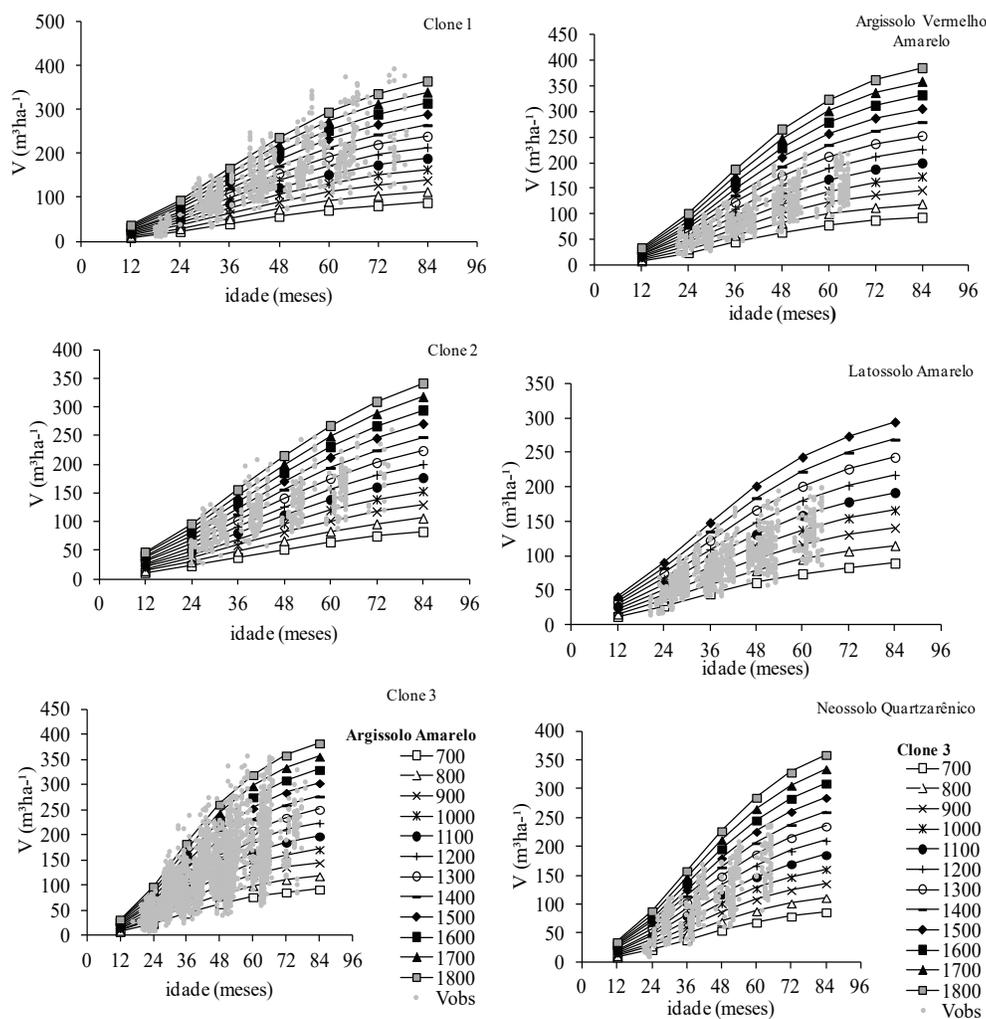
demais precipitações dentro da faixa de amplitude do ajuste. A projeção do volume de madeira foi feita considerando uma precipitação média de 1.083 mm para todas as combinações de clones e solo, como exemplo. Porém, as demais curvas foram apresentadas na Figura 4. Nessa figura é possível observar a consistência entre as projeções e os dados observados. A produção aos 84 meses e as idades técnicas de corte para o modelo de Gompertz tradicional e modificado podem ser verificadas na Tabela 5.



**Figura 2.** Curva de crescimento em altura dominante (Hd), em m, diâmetro quadrático (q), em cm, área basal, em  $m^2ha^{-1}$  e volume de madeira,  $m^3ha^{-1}$  para os três clones no Argissolo Amarelo (A) e o clone 3 nos diferentes tipos de solo (B) em função da idade.



**Figura 3.** Modelo de Gompertz com inclusão de precipitação pluviométrica. (A) Curvas de produção, dos diferentes clones no Argissolo Amarelo, e (B) do clone 3 nos diferentes tipos de solo, considerando a precipitação média de 1.083 mm.



**Figura 4.** Curvas médias de produção ( $m^3 ha^{-1}$ ) para as precipitações pluviométricas ocorridas em cada estrato (clone e solo) entre os anos 2007 a 2011. As idades de projeção são apresentadas no eixo x. No eixo y são apresentadas as produções média para cada PP em  $m^3 ha^{-1}$ .

**Tabela 4.** Estimativas dos parâmetros do modelo Gompertz com a inclusão do modificador no parâmetro  $\beta_0$  associado a precipitação para estimar o volume de madeira, para cada combinação de solo e clone na região Nordeste da Bahia.

Clone	Solo	$\hat{\phi}_0$	$\hat{\phi}_1$	$\hat{\phi}_2$	$\hat{\phi}_3$	AIC	Bias
1	Argissolo Amarelo	73,16485	0,147791	1,526750	0,046461	7,51	6,14
2	Argissolo Amarelo	58,57530	0,116591	1,356492	0,047506	7,56	29
3	Argissolo Amarelo	-60,4778	0,261673	1,448647	0,044279	6,75	-5,44
3	Argissolo Vermelho-Amarelo	45,65095	0,168952	1,411464	0,040797	6,51	-13,6
3	Latossolo Amarelo	-31,5084	0,179927	1,590099	0,058937	6,74	14,5
3	Neossolo Quartzarênico	72,27496	0,165322	1,363699	0,035439	6,90	-16,4

Em que:  $\hat{\phi}_n$ ,- coeficientes da regressão, AIC - critério de Akaike e Bias.

**Tabela 5.** Volume de madeira aos 84 meses (V) e idade técnica de corte (ITC) obtidos com as equações para cada estrato, com e sem o efeito da precipitação pluviométrica.

Clone	Classe de solo	Sem precipitação		Com precipitação	
		V (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	ITC (meses)	V (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	ITC meses
1	Argissolo Amarelo	254,9883	55	192,20	51
2	Argissolo Amarelo	181,3278	39	196,31	43
3	Argissolo Amarelo	214,7025	51	190,23	51
3	Argissolo Vermelho-Amarelo	185,2709	53	184,61	53
3	Latossolo Amarelo	121,9663	44	203,72	43
3	Neossolo Quartzarênico	215,7973	63	172,82	60
<b>Média</b>			<b>50,83</b>		<b>50,16</b>
<b>Total</b>		<b>1.174,05</b>		<b>1.139,89</b>	

A estratificação dos modelos por tipo de solo e a inclusão da covariante precipitação pluviométrica para a modelagem volumétrica resultou em estimativas com exatidões compatíveis com o que se têm observado em estudos de modelagem (Snowdon et al., 1998; Soares & Leite, 2000; Temps, 2005). A adição da precipitação pluviométrica aumentou a flexibilidade do modelo de Gompertz de se adaptar às variações nas condições do local. As diferenças entre as produções médias estimadas pelas equações sem e com o efeito da precipitação foram significativas a 5% de probabilidade pelo teste de identidade de modelos (Graybill, 1979). O modelo ajustado com a precipitação reduziu os erros em cerca de 62,9%, em comparação ao modelo biológico tradicional (Tabelas 3 e 4).

As médias de volume obtidas pelos modelos com precipitação, devido a essa maior exatidão, foram significativamente menores que as obtidas pelo modelo de Gompertz sem o modificador linear, com diferenças de 2,9% entre os volumes aos sete anos (Tabela 5). No entanto, não houve alteração nas idades técnicas de

corte (ITC) média dos estratos. Em alguns casos, as ITC obtidas com o modelo sem a consideração da variável ambiental ocorreram três meses mais tarde.

A relação entre o crescimento em volume e a precipitação é esperada em ambientes com alta variabilidade na disponibilidade de água (Souza et al., 2006). Em estudos de crescimento e produção de eucalipto no Nordeste da Bahia, considerando a variabilidade da precipitação pluviométrica na região, Soares & Leite (2000) incluíram a covariante PP na equação da área basal do modelo de Clutter e Miranda et al. (2014) ajustaram o modelo de Clutter (1963) por classe de precipitação. Os dois trabalhos verificaram uma redução de 0,81% nos erros das estimativas ajustando o modelo de Clutter (1963) para cada estrato de precipitação pluviométrica.

Em alguns locais da região nordeste da Bahia, principalmente em plantios jovens, os clones não foram mensurados. A solução nesse caso, de acordo com Oliveira et al. (2009), pode ser o uso de uma curva de produção média gerada com dados de região ou estrato semelhantes. As equações obtidas no presente estudo apresentam potencial para utilização, por terem sido geradas para diferentes clones, tipos solos e precipitações pluviométricas médias anuais.

O coeficiente  $\beta_0$  do modelo de Gompertz representa a máxima capacidade de produção, que tende a se estabilizar com o avanço da idade (Winsor, 1932; Richards, 1959; Temps, 2005). A inserção de um parâmetro modificador no modelo associa o efeito da precipitação pluviométrica ao crescimento e produção do povoamento (Maestri, 2003; Machado et al., 2014). Assim, é possível projetar o estoque considerando casos extremos das alterações no regime de chuvas e, também, definir os limites do intervalo de previsão, informação importante para a análise de risco durante o planejamento dos plantios (Soares & Leite, 2000).

A probabilidade que a produção ocorra com os valores extremos de precipitação é baixa (Soares & Leite, 2000). No entanto, para o planejamento em longo prazo é necessário conhecer os riscos existentes associados às alterações sazonais no clima (Ferreira, 2009).

## Conclusões

A inclusão da precipitação pluviométrica no modelo de Gompertz aumenta a exatidão das estimativas volumétricas da produção em madeira de eucalipto do Nordeste da Bahia.

As análises das curvas de crescimento em diferentes tipos de solos e precipitações pluviométricas auxiliam na definição do clone mais adequado, para locais onde não há informações de inventário.

## Referências

- Araújo, P. H. C. et al. Uma análise do impacto das mudanças climáticas na produtividade agrícola da região nordeste do Brasil. **Revista Economia**, v. 45, n. 3, p. 46-57, 2014.
- Baesso, R. C. E. et al. Impacto das mudanças climáticas na produtividade do eucalipto na região norte do Espírito Santo e sul da Bahia. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 2, p. 335-344, 2010.
- Campos, J. C. C. & Leite, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 4. ed. Viçosa, MG: Ed da UFV, 2013. 548 p.
- Carvalho, A. P. et al. Efeitos de características dos solos sobre a capacidade produtiva de *Pinus taeda*. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 39, p. 51-66, 1999.
- Clutter, J. L. Compatible growth and yield models for loblolly pine. **Forest Science**, v. 9, n. 3, p. 354-371, 1963.
- Ferreira, M. Z. **Modelagem da influência de variáveis ambientais no crescimento e na produção de Eucalyptus sp.** 2009. 101 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- Flexas, J. et al. Effects of drought on photosynthesis in grapevines under field conditions. **Functional Plant Biology**, v. 29, p. 461-471, 2002.
- Gonçalves, J. L. M. et al. Produtividade de plantações de eucalipto manejadas nos sistemas de alto fuste e talhadia, em função de fatores edafoclimáticos. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 103, p. 411-419, 2014.
- Graybill, F. A. **Theory and applications of the linear model**. Pacifi Grove: Duxbury, 1976.
- Gujarati, D. N. & Porter, D. C. **Econometria básica**. 5. ed. Bookman: Porto Alegre, 2011.
- Indústria Brasileira de Árvores. **IBÁ 2015**. São Paulo, 2015. 61 p. Relatório IBÁ 2015 relativo a 2014. Disponível em: <[http://iba.org/images/shared/iba\\_2015.pdf](http://iba.org/images/shared/iba_2015.pdf)>. Acesso em: 18 fev. 2016.
- Machado, S. A. et al. Efeito das variáveis climáticas no crescimento mensal de *Pinus taeda* e *Araucaria angustifolia* em fase juvenil. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 2, p. 170-181, 2014.
- Maestri, R. **Modelo de crescimento e produção para povoamentos clonais de Eucalyptus grandis considerando variáveis ambientais**. 2003. 143 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Miranda, R. O. V. et al. Modelagem do crescimento e produção em classes de precipitação pluviométrica para *Eucalyptus sp.* **Floresta**, v. 45, n. 1, p. 117-128, 2014.
- Oliveira, M. L. R. et al. Modelagem e prognose em povoamentos não desbastados de clones de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 33, n. 5, p. 841-852, 2009.
- Perez-Garcia, J. et al. Impacts of climate change on the global forest sector. **Climatic Change**, v. 54, n. 4, p. 439-461, 2002.
- Richards, F. J. A flexible growth function for empirical use. **Journal of experimental Botany**, v. 10, n. 2, p. 290-30, 1959. DOI: 10.1093/jxb/10.2.290.
- Soares, C. P. B. & Leite, H. G. Predição da produção de madeira de eucalipto em região de alta variabilidade pluviométrica. **Scientia Forestalis**, v. 58, n. 103, p. 41-48, 2000.
- Souza, M. J. H. et al. Disponibilidade hídrica do solo e produtividade do eucalipto em três regiões da bacia do rio Doce. **Revista Árvore**, v. 30, n. 3, p. 399-410, 2006.
- Snowdon, P. et al. Incorporation of climatic indices into models of growth of *Pinus radiata* in a spacing experiment. **New Forest**, v. 16, n. 1, p. 101-123, 1998. DOI: 10.1023/A:1006524609459.
- Snowdon, P. et al. Incorporation of indices of annual climatic variation into growth models for *Pinus radiata*. **Forest Ecology and Management**, v. 117, n. 1-3, p. 187-197, 1999. DOI: 10.1016/S0378-1127(98)00463-0.
- Stape, J. L. et al. Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of the use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1-2, p. 17-31, 2004.
- Stape, J. L. **Production ecology of clonal eucalyptus plantation in Northeastern Brazil**. 2002. 225 f. Thesis (Ph. D.) - Colorado State University, Colorado.
- Statsoft Inc. Data analysis software system: version 13. Tulsa, 2013. Electronic version. Disponível em: <<http://www.statsoft.com/textbook/>>. Acesso em: 25 out. 2015.
- Temps, M. **Adição da precipitação pluviométrica na modelagem do crescimento e da produção florestal em povoamentos não desbastados de Pinus taeda L.** 2005. 83 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Thiessen, A. H. Precipitation averages for large areas. **Monthly Weather Review**, v. 39, p. 1082-1089, 1911. DOI: 10.1175/1520-0493(1911)39<1082b:PAFLA>2.0.CO;2.
- Turvey, N. D. Soil-type yield curves for *Pinus radiata* in Gippsland, Victoria. **Australian Forestry**, v. 46, n. 2, p. 118-125, 1983. DOI: 10.1080/00049158.1983.10674387.

Zamin, N. T. et al. Effect of Climate variables on monthly growth in modeling biological yield of *Araucaria angustifolia* and *Pinus taeda* in the juvenile phase. **International Journal of Forestry Research**, v. 2013, 2013. DOI: 10.1155/2013/646759.

Winsor, C. P. The Gompertz curve as a growth curve. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 18, p. 1-8, 1932.