

## Descrição das curvas de germinação de plantas daninhas em diferentes temperaturas por modelos não lineares

Edilene C. P. Azarias<sup>†1</sup>, Rafaela C. Salvador<sup>1</sup>, Edilson M. Silva<sup>2</sup>, Joel A. Muniz<sup>3</sup>, Luiz E. M. Machado<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Doutorando em Estatística e Experimentação Agropecuária, UFLA.

<sup>2</sup>Pós-doutorando em Estatística e Experimentação Agropecuária, UFLA.

<sup>3</sup>Docente do Departamento de Estatística, Universidade Federal de Lavras (UFLA).

**Resumo:** *A propagação de plantas daninhas pode ocorrer de várias formas, tanto por meio de sementes que podem se desprender de plantas que já estão no local, além de serem transportadas por maquinários, vento, animais e seres humanos. A utilização de modelos estatísticos pode auxiliar em uma melhor compreensão do processo de germinação cumulativa de sementes e auxilia no sistema de manejo a ser empregado. O objetivo deste trabalho foi utilizar os modelos não lineares Logístico e Gompertz, avaliando qual é o mais adequado, na descrição da curva de germinação cumulativa de três espécies de plantas daninhas, também explorar as derivadas de primeira à quarta ordem analisando os pontos críticos das curvas. Foram utilizados: fotoperíodo (8 horas de luz/16 horas de escuro) com temperatura (alternada ou constante) e avaliadas a germinação percentual das sementes aos 2, 4, 6, 8, 10, 12 e 14 dias após semeadura. Os parâmetros dos modelos foram estimados pelo método de mínimos quadrados com o uso do método iterativo de Gauss-Newton. Os avaliadores de qualidade de ajuste utilizados foram: coeficiente de determinação, desvio padrão residual e critério de informação de Akaike, pelo software R. O modelo Gompertz foi o mais adequado para descrever os dados. Nas duas condições de germinação a espécie *A. viridis* foi a que apresentou menores e maiores valores de  $\beta$  e  $k$ , respectivamente, seguida pela *A. spinosus* e *A. deflexus*. Em relação aos pontos críticos a *A. viridis* se mostrou mais precoce, porém a *A. spinosus* foi a que apresentou maior porcentagem de germinação.*

**Palavras-chave:** *modelo Gompertz; modelo Logístico; Amaranthus; pontos críticos; sementes.*

## Description of weed germination curves at different temperatures using nonlinear models

**Abstract:** *The spread of weeds can occur in various ways, both through seeds that can detach from plants already present in the area and be carried by machinery, wind, animals, and humans. The use of statistical models can help in a better understanding of the cumulative seed germination process and aid in the management system. The objective of this study was to use the non-linear Logistic and Gompertz models, evaluating which one is more suitable to describe the cumulative germination curve of three weed species, as well as exploring the first to fourth-order derivatives to analyze the critical points of the curves. The following conditions were used: photoperiod (8 hours of light/16 hours of darkness) with temperature (alternating or constant), and the percentage germination of seeds was evaluated at 2, 4, 6, 8, 10, 12, and 14 days after sowing. The model parameters were estimated using the method of least squares with the iterative Gauss-Newton method. The quality of fit was assessed using the coefficient of determination, residual standard deviation, and Akaike information criterion, through R software. The Gompertz model was found to be the most suitable for describing the data. Under both germination conditions, the species *A. viridis* showed the lowest and highest values of  $\beta$  and  $k$ , respectively, followed by *A. spinosus* and *A. deflexus*. Regarding critical points, *A. viridis* showed the earliest germination, but *A. spinosus* had the highest germination percentage.*

**Keywords:** *Gompertz model; Logistic model; Amaranthus; critical points; seeds.*

<sup>†</sup>Autora correspondente: [edilene.cris100@hotmail.com](mailto:edilene.cris100@hotmail.com)

## Introdução

Uma das formas mais comuns de propagação de plantas daninhas é por meio de sementes, que podem ser dispersas pelo vento, água, animais e seres humanos. A germinação de semente é um processo fundamental para o estabelecimento e crescimento dessas plantas em um determinado ambiente e pode permanecer dormente no solo até encontrar condições ideais para sua germinação. Para que isso ocorra, elas precisam estar em contato com água, oxigênio e nutrientes adequados, além de estarem expostas às condições ambientais que favoreçam esse processo, como temperatura e luminosidade (MONQUERO; CHRISTOFFOLETI, 2005).

Para controlar a propagação de plantas daninhas, os agricultores utilizam diferentes técnicas e estratégias de manejo, como o uso de herbicidas pré-emergentes, que são aplicados no solo antes da germinação das sementes, ou de práticas culturais, como a rotação de culturas e a utilização de cobertura vegetal, que reduzem a quantidade de plantas daninhas no solo e minimizam a germinação das sementes restantes no local (JUNIOR; CONSTANTIN; INOUE, 2011).

Dentre as várias espécies de plantas daninhas que são encontradas em áreas agrícolas, é muito comum as plantas do gênero *Amaranthus*, que pertencem à família *Amaranthaceae*. São plantas anuais, herbáceas, consideradas invasivas e difíceis de controlar, pois algumas possuem grande produção de esporos ou sementes, que são uma das suas principais formas de propagação. Isso as torna capazes de se disseminarem rapidamente, inclusive para outras áreas. Possuem rápido crescimento e se adaptam a qualquer tipo de solo e condições climáticas. Além disso, algumas apresentam resistência a herbicidas (CARVALHO et al., 2006).

Compreender os padrões de germinação dessas plantas é fundamental para o desenvolvimento de estratégias eficazes de controle. Nesse sentido, a utilização de modelos estatísticos pode ser uma ferramenta importante para a análise e previsão do comportamento da germinação de sementes de plantas daninhas (SOUSA et al., 2014). Existem diversos modelos de regressão não lineares que são utilizados para descrever curvas de crescimento de plantas, animais, frutos, dentre outros. A utilização desses modelos é essencial para que os pesquisadores possam analisar e compreender o processo de germinação ao longo do tempo. De acordo com Sousa et al. (2014), a germinação acumulada de sementes ao longo do tempo possui um comportamento sigmoidal e pode ser adequadamente descrita por meio de modelos não lineares.

Dentre os modelos não lineares mais utilizados estão o Logístico e o Gompertz, que foram usados por vários autores em seus estudos como (MELLO et al., 2021; DE BRITES SENRA, et al., 2022; FRÜHAUF et al., 2022).

Em relação as vantagens de se utilizar os modelos de regressão não linear podemos citar, a interpretação biológica dos parâmetros, que podem auxiliar o profissional da área na tomada de decisão e, além disso, são mais parcimoniosos, pois apresentam poucos parâmetros, que resumem bem os dados (FERNANDES et al., 2015). Fornecem também pontos importantes para a análise da curva de germinação como: aceleração máxima (PAM), desaceleração máxima (PDM), desaceleração assintótica (PDA) e inflexão (PI), que são determinados com o estudo de derivadas de ordem superior. Esses pontos críticos foram estudados no crescimento do fruto do coco (SILVA et al., 2021) e de cavalos da raça campolina (TEIXEIRA et al., 2021).

O objetivo deste trabalho foi utilizar os modelos não lineares Logístico e Gompertz na descrição da curva de germinação de três espécies de plantas daninhas do gênero *Amaranthus* com influência de luz (fotoperíodo) e da temperatura (alternância ou constância) e explorar as derivadas de primeira à quarta ordem, analisando os pontos críticos das curvas de germinação. Além de avaliar qual é o modelo mais adequado para descrever o processo germinativo de cada espécie, fornecendo informações práticas e relevantes, relacionados ao manejo, para os pesquisadores da área.

## Material e Métodos

Os dados analisados neste estudo foram extraídos do artigo de Carvalho e Christoffoleti (2007), o experimento foi conduzido em 2005 no Laboratório de Análise de Sementes da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP.

Foram avaliadas diferentes condições de germinação (luz e temperatura) em espécies de plantas daninhas do gênero *Amaranthus*. As condições de germinação utilizadas foram: fotoperíodo com alternância de temperatura e com temperatura constante. O fotoperíodo utilizado foi o de 8 horas de luz e 16 horas de escuro, a alternância de temperatura foi de 8 horas a 30 °C e 16 horas a 20 °C e a temperatura constante de 25 °C. Avaliou-se a germinação percentual das sementes aos 2, 4, 6, 8, 10, 12 e 14 dias após semeadura (DAS).

Para esse estudo foram consideradas três espécies: *Amaranthus deflexus* (caruru-rasteiro), *Amaranthus spinosus* (caruru-de-espinho) e *Amaranthus viridis* (caruru-de-mancha). Foram utilizadas sementes de *Amaranthus viridis*, e frutos de *Amaranthus deflexus* e *Amaranthus spinosus*, de acordo com seus processos de disseminação. Para a análise dos dados foram ajustados os modelos não lineares Logístico (1) e Gompertz (2),

$$Y_i = \frac{\alpha}{1 + e^{\kappa(\beta - X_i)}} + \varepsilon_i \quad (1)$$

$$Y_i = \alpha e^{-e^{\kappa(\beta - X_i)}} + \varepsilon_i \quad (2)$$

em que,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $Y_i$  é a porcentagem de germinação acumulada das sementes;  $X_i$  dias após a semeadura (DAS) das sementes,  $\alpha$  é a maior porcentagem cumulativa da germinação;  $\beta$  tempo em que  $Y$  atinge metade de seu valor máximo, considerando o modelo Logístico, e aproximadamente 37% de seu valor máximo no modelo Gompertz e  $k$  está relacionado a velocidade de crescimento e  $\varepsilon_i$  os erros aleatórios atribuídos ao modelo, pressupõe-se que sejam independentes e identicamente distribuídos com distribuição normal de média zero e variância constante, ou seja,  $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$ .

Os parâmetros dos modelos foram estimados pelo método de mínimos quadrados, que envolve a minimização da soma de quadrado dos resíduos levando a um sistema de equações normais não lineares sem solução direta, exigindo o uso de métodos iterativos para obtenção das estimativas, assim foi utilizado o método de Gauss-Newton para a solução do sistema, por ser o mais utilizado na literatura (SILVA et al., 2019).

Após os ajustes foram realizadas as análises de resíduos, ou seja, para verificar os pressupostos de normalidade, homogeneidade e independência do modelo, foram usados o teste de Shapiro-wilk (1965), Breuch-Pagan (1979) e Durbin Watson (1950).

Foi utilizado também o teste t de Student para verificar a significância dos parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $k$  onde a hipótese nula ( $H_0$ ) é de que o parâmetro é igual a zero e a hipótese alternativa ( $H_a$ ) de que o parâmetro é diferente de zero.

A avaliação e comparação da qualidade do ajuste dos modelos, foram realizadas utilizando os critérios de informação de Akaike (AIC), desvio padrão residual (DPR) e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), sendo considerado como melhor modelo aquele que apresentou o maior valor de  $R^2$  e menores valores para o DPR e AIC.

Foram calculadas também as coordenadas dos pontos críticos dos modelos que melhor se ajustaram aos dados de cada espécie de planta daninhas, ou seja, o ponto de aceleração máxima (PAM), ponto de inflexão (PI), ponto de desaceleração máxima (PDM) e ponto de desaceleração assintótico (PDA), com base no artigo de Silva et al. (2020).

Todas as análises dos dados deste trabalho foram feitas utilizando-se software estatístico R de acesso livre (R CORE TEAM, 2023). Os pacotes utilizados foram “nlme” (Pinheiro et al., 2023), “car” (John; Sanford, 2023), “lmtest” (Achim; Hothorn, 2022). O nível de significância adotado para os testes foi de 5%.

## Resultados e Discussão

Foi utilizado o método de mínimos quadrados ordinários para realizar os ajustes dos dois modelos aos dados e, posteriormente foram realizadas as análises de resíduos, com a intenção de verificar se os pressupostos de normalidade, homogeneidade de variâncias e independência dos resíduos foram atendidos, utilizando os testes de Shapiro-Wilk, Breusch-Pagan e Durbin-Watson, respectivamente. Considerando um nível de significância de 5%.

Todos os ajustes apresentaram normalidade, a maioria apresentou autocorrelação e somente para a *A. viridis* no modelo Logístico o pressuposto de homogeneidade de variâncias não foi atendido. Assim, os parâmetros foram ajustados novamente com as devidas correções. Resíduos autocorrelacionados foram também verificados por: (SILVA et al., 2020; FRÜHAUF et al., 2020; PRADO, et al., 2020) em estudos do crescimento de amora-preta, crescimento diamétrico de cedro e da cavidade interna de frutos de coco anão verde, respectivamente.

Os avaliadores de qualidade de ajuste dos modelos para a condição de germinação com alternância de temperatura (20-30°C) estão apresentados na Tabela 1, com base nos resultados obtidos o modelo Gompertz apresentou menores AIC e DPR e maiores  $R^2$  para todas as espécies, o que indica que esse modelo é o que descreve melhor os dados.

Os modelos Logístico e Gompertz foram avaliados, considerando estrutura de erros autocorrelacionados (AR1), por Sousa et al. (2014), na descrição de sementes de café, ambos modelos se adequaram bem aos dados e o modelo Gompertz foi o que melhor se ajustou. De acordo com os autores esses modelos são adequados para a descrição de germinação de sementes, pois com a interpretação dos parâmetros obtém-se informações como a porcentagem máxima de germinação acumulada, além do tempo e velocidade necessários para se chegar ao máximo da germinação da semente.

Tabela 1: Avaliadores da qualidade de ajuste dos modelos Logístico e Gompertz para germinação com temperatura alternada (20-30° C)

Espécies	Modelo	AIC	DPR	$R^2$
<i>A. spinosus</i>	Logístico	53,275	2,284	0,994
	Gompertz	24,723	0,669	0,999
<i>A. viridis</i>	Logístico	74,943	2,519	0,982
	Gompertz	56,009	1,340	0,995
<i>A. deflexus</i>	Logístico	42,063	4,988	0,954
	Gompertz	16,156	0,355	0,999

Fonte: Dos autores.

Foram testadas as significâncias dos parâmetros do modelo utilizando o teste t de Student. Todos foram significativos ao nível de 5% de significância e estatisticamente diferentes de zero, indicando que o modelo foi adequado para descrever os dados. Os resultados estão na Tabela 2. Foi considerada variância heterogênea e adicionado o parâmetro autorregressivo de primeira ordem AR(1), quando necessário.

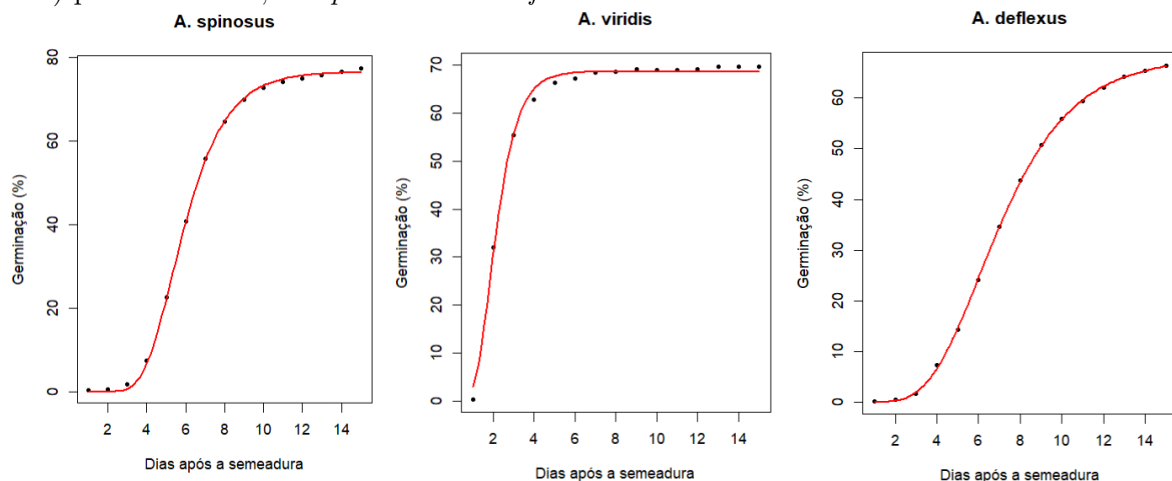
Observa-se que as estimativas do parâmetro  $\alpha$ , que está relacionado a porcentagem cumulativa de germinação, nas espécies *A. viridis* e *A. deflexus*, apresentaram sobreposição nos intervalos de confiança, ou seja, não há diferença entre esse parâmetro nessas duas espécies. O critério de sobreposição de intervalos de confiança também foi utilizado por Kleinpaul et al. (2019), e considera que, caso o limite superior e inferior da estimativa de algum parâmetro se sobrepuser ao de outra, as características envolvidas nos parâmetros não diferem entre si, e se ocorrer o contrário, há diferença entre essas características.

Tabela 2: Estimativas para os parâmetros do modelo Gompertz com intervalos de confiança de 95%, ajustados para germinação com alternância de temperatura (20-30° C)

Espécies	Parâmetros	LI	Estimativa	LS
<i>A. spinosus</i>	$\alpha$	75,366	76,581	77,797
	$\beta$	5,257	5,323	5,390
	$k$	0,640	0,669	0,698
	$\phi$	0,234	0,768	0,946
<i>A. viridis</i>	$\alpha$	67,920	68,719	69,518
	$\beta$	1,773	1,846	1,919
	$k$	1,187	1,353	1,520
<i>A. deflexus</i>	$\alpha$	67,342	67,884	68,425
	$\beta$	5,999	6,040	6,081
	$k$	0,401	0,412	0,423

Fonte: Dos autores.

A *A. viridis* apresentou menor valor para  $\beta$ , seguida da *A. spinosus* e *A. deflexus*, também foi a espécie com maior valor de  $k$ , que é a velocidade de germinação, ou seja, a germinação acumulada dessa espécie ocorreu em menor tempo que as demais, o que está em consonância com os resultados obtidos por Carvalho e Christoffoleti (2007), que sugerem que isso pode estar relacionado a forma de disseminação das espécies, na *A. viridis* se dá por meio de sementes e para a *A. spinosus* e *A. deflexus* por frutos. Os ajustes do modelo Gompertz, considerando germinação com alternância de temperatura (20-30° C), das três espécies estão representados na Figura 1, observa-se visualmente que o modelo se ajustou bem aos dados.

Figura 1: Ajuste do modelo Gompertz para germinação com alternância de temperatura (20-30°C) para *A. viridis*, *A. spinosus* e *A. deflexus*

Fonte: Dos autores.

Foram realizados os cálculos dos pontos críticos das curvas de germinação com os valores dos parâmetros encontrados considerando o modelo Gompertz, os resultados estão apresentados na Tabela 3.

Entre os pontos de PAM e PDM está a fase de crescimento mais acelerado, que para o modelo Gompertz ocorre em 60,96% da germinação acumulada da semente (MISCHAN; PINHO, 2014). Na espécie *A. viridis* ocorreu aproximadamente entre 1 até 3 DAS. Quando comparado aos das outras espécies foi inferior, esse seria o período ideal para tomar alguma medida para combater essa planta daninha. Também foi a espécie que apresentou PDA anterior que ocorreu aproximadamente aos 3 DAS, com 58% de germinação máxima acumulada, enquanto que para

Tabela 3: Pontos críticos: ponto de aceleração máxima (PAM), ponto de inflexão (PI) ponto de desaceleração máxima (PDM) e ponto de desaceleração assintótica (PDA), para germinação com alternância de temperatura (20-30° C)

Espécies	Ponto	PAM	PI	PDM	PDA
<i>A. spinosus</i>	Abscissa	3,885	5,323	6,762	8,012
	Ordenada	5,586	28,172	52,318	64,887
<i>A. viridis</i>	Abscissa	1,135	1,846	2,556	3,174
	Ordenada	5,013	25,280	46,947	58,226
<i>A. deflexus</i>	Abscissa	3,705	6,040	8,375	10,403
	Ordenada	4,952	24,973	46,377	57,518

Fonte: Dos autores.

a *A. spinosus* aos 8 DAS foi de 64%. Em seus estudos sobre o crescimento e desenvolvimento de espécies de plantas daninhas Carvalho et al. (2008), constataram que a *A. viridis* cresceu e se desenvolveu mais rápido do que as outras espécies do mesmo gênero.

Os pontos críticos dos modelos Logístico e Gompertz foram utilizados por: Kleinpaul et al. (2019), para a descrição do acúmulo de massa fresca e seca em cultivares de centeio em épocas diferentes de semeadura; Mello et al. (2022), no crescimento em altura da cultivar de girassol Rhino. Em germinação de sementes, estudos dos pontos críticos também podem ser importantes, principalmente para prever o comportamento germinativo e na determinação de épocas tanto para aplicação de fertilizantes quanto no controle de plantas daninhas.

Na Tabela 4 estão apresentados os avaliadores de qualidade de ajuste dos modelos Logístico e Gompertz para a germinação em condição de temperatura constante (25°C), pode-se observar novamente com bases nos resultados obtidos, que o modelo Gompertz apresentou menores valores de AIC e DPR e maiores valores  $R^2$  para todas as espécies, o que indica que esse modelo é o que descreve melhor os dados.

Tabela 4: Avaliadores da qualidade de ajuste dos modelos Logístico e Gompertz para germinação com temperatura constante (25°C)

Espécies	Modelo	AIC	DPR	$R^2$
<i>A. spinosus</i>	Logístico	25,196	0,867	0,990
	Gompertz	-2,203	0,192	0,999
<i>A. viridis</i>	Logístico	57,236	1,396	0,990
	Gompertz	18,041	0,840	0,997
<i>A. deflexus</i>	Logístico	30,564	1,714	0,973
	Gompertz	-5.451	1,714	0,999

Fonte: Dos autores.

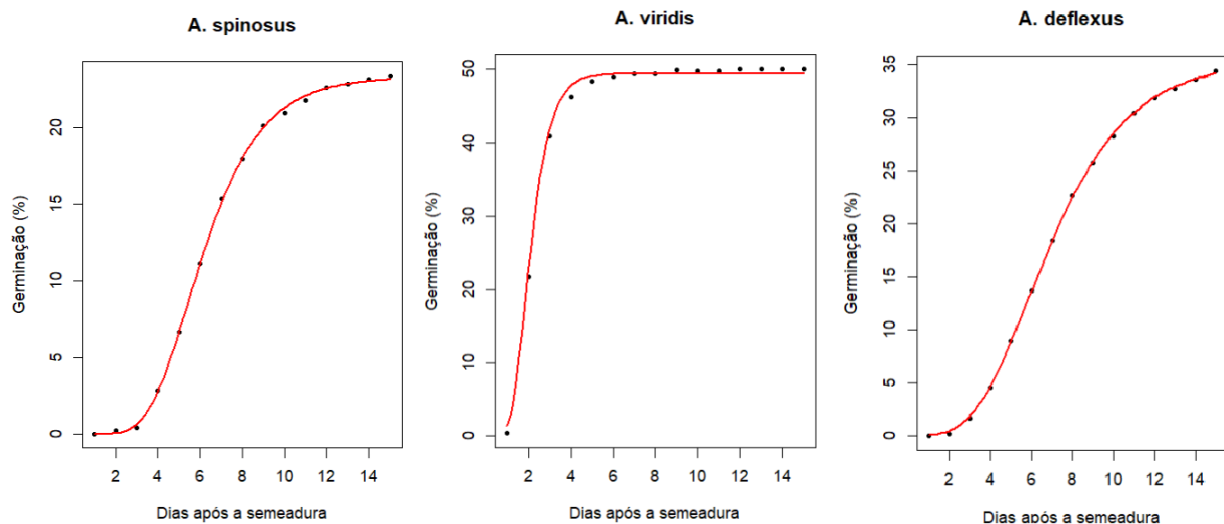
Foram testadas as significâncias dos parâmetros do modelo utilizando o t de Student. Todos foram significativos ao nível de 5% de significância e estatisticamente diferentes de zero, indicando que o modelo foi adequado para descrever os dados. Os resultados estão na Tabela 5, foi adicionado o termo autorregressivo de primeira ordem AR(1), quando necessário.

Os intervalos de confiança para as três espécies não se sobrepuseram, indicando que há diferenças entre elas. A espécie *A. viridis* apresentou maior porcentagem cumulativa de germinação ( $\alpha$ ), o que foi alcançada em menor tempo (menor  $\beta$ ), ocorrendo novamente aproximadamente aos 2 DAS com 49% de germinação acumulada, e anterior as outras (menor  $k$ ), seguida da *A. spinosus* e *A. deflexus*. Esses resultados podem ser observados pelos ajustes do modelo Gompertz representados na Figura 2, nota-se visualmente que o modelo ajustou bem aos dados nas três espécies.

Tabela 5: Estimativas para os parâmetros do modelo Gompertz com intervalos de confiança de 95%, ajustados para germinação com temperatura constante (25° C)

Espécies	Parâmetros	LI	Estimativa	LS
<i>A. spinosus</i>	$\alpha$	23,050	23,259	23,469
	$\beta$	5,370	5,421	5,472
	$k$	0,508	0,529	0,550
<i>A. viridis</i>	$\alpha$	48,141	49,472	50,803
	$\beta$	1,808	1,838	1,867
	$k$	1,441	1,541	1,641
	$\phi$	0,483	0,918	0,990
<i>A. deflexus</i>	$\alpha$	34,867	35,308	35,748
	$\beta$	5,799	5,871	5,943
	$k$	0,361	0,375	0,390
	$\phi$	-0,097	0,464	0,802

Fonte: Dos autores.

Figura 2: Ajuste do modelo Gompertz para germinação com temperatura constante (25° C) para *A. viridis*, *A. spinosus* e *A. deflexus*

Fonte: Dos autores.

Tabela 6: Pontos críticos: ponto de aceleração máxima (PAM), ponto de inflexão (PI) ponto de desaceleração máxima (PDM) e ponto de desaceleração assintótica (PDA), para germinação com temperatura constante (25° C)

Espécies	Ponto	PAM	PI	PDM	PDA
<i>A. spinosus</i>	Abscissa	3,604	5,421	7,238	8,816
	Ordenada	1,697	8,557	15,890	19,708
<i>A. viridis</i>	Abscissa	1,213	1,837	2,462	3,004
	Ordenada	3,609	18,199	33,798	41,917
<i>A. deflexus</i>	Abscissa	3,306	5,871	8,435	10,662
	Ordenada	2,576	12,989	24,122	29,916

Fonte: Dos autores.

Semelhante aos resultados da germinação com alternância de temperatura a espécie *A. viridis* apresentou PAM, PDM e PDA anterior as demais, ocorrendo aproximadamente entre 1 e 3 DAS,

**Sigmae**, Alfenas, v.12, n.3, p. 1-9. 2023.

67ª Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria (RBras) e 20º Simpósio de Estatística Aplicada à Experimentação Agronômica (SEAGRO)

e apresentou 41,92% de germinação máxima acumulada. Já a *A. spinosus* apresentou menor porcentagem de acúmulo máximo de germinação, aos 8 DAS acumulou 19,71%. Os resultados estão apresentados na Tabela 6.

Pode-se observar também que houve diferenças das porcentagens máximas acumuladas de germinação das espécies nas duas condições de temperatura, sendo que a espécie que apresentou maior taxa de germinação acumulada foi a *A. spinosus* de aproximadamente 65% aos 8 DAS, em condições de temperatura alternada, para essa mesma espécie, em condições de temperatura constante, ocorreu também com 8 DAS, mas com 20% de germinação.

## Conclusões

Com base nos critérios de qualidade, o modelo Gompertz foi o que melhor se adequou aos dados para todas as espécies e nas duas condições de germinação.

Nas duas condições de germinação a espécie *A. viridis* foi a que apresentou menores e maiores valores de  $\beta$  e  $k$ , respectivamente, seguida pela *A. spinosus* e *A. deflexus*.

Em relação aos pontos críticos a *A. viridis* também se mostrou mais precoce que as demais.

As espécies *A. viridis* e *A. spinosus* exibiram maior porcentagem de germinação acumulada na condição de germinação com temperatura constante e temperatura alternada, respectivamente.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG, à CAPES e ao CNPQ pelo apoio financeiro.

## Referências

ACHIM, Z.; TORSTEN, H. Diagnostic checking in regression relationships. *R News*, v.2, n.3, p.7-10, 2002. Available from: URL

<https://cran.r-project.org/web/packages/lmtest/index.html>.

CARVALHO, S. et al. Suscetibilidade diferencial de plantas daninhas do gênero *Amaranthus* aos herbicidas trifloxysulfuron-sodium e chlorimuron-ethyl. *Planta daninha*, v. 24, p. 541–548, 2006.

CARVALHO, S. J. P.; CHRISTOFFOLETI, P. J.. Influência da luz e da temperatura na germinação de cinco espécies de plantas daninhas do gênero *Amaranthus*. *Bragantia*, v. 66, p. 527-533, 2007.

CARVALHO, S. J. P.; LÓPEZ-OVEJERO, R. F.; CHRISTOFFOLETI, P. J. Crescimento e desenvolvimento de cinco espécies de plantas daninhas do gênero *Amaranthus*. *Bragantia*, v. 67, n. 2, p. 317–326, 2008.

DE BRITES SENRA, J. F. et al. Seleção de modelos não lineares e o estudo do crescimento dos frutos de café conilon. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 4, p. e21511427093-e21511427093, 2022.

FERNANDES, T. J. et al.  $\beta$  parameterization effects in nonlinear models to describe growth curves. *Acta Scientiarum. Technology*, v. 37, n. 4, p. 397–402, 2015.



- FRÜHAUF A. C. et al. Nonlinear models in the study of the cedar diametric growth in a seasonally dry tropical forest. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 15, n. 4, p.1-8, 2020.
- FRÜHAUF, A. C. et al. Description of height growth of hybrid eucalyptus clones in semi-arid region using non-linear models. *Brazilian Journal of Biometrics*. v. 40, n. 2, p. 138-151, 2022.
- JOHN, F.; SANDFOR W. An R companion to applied regression. 3rd ed. Thousand Oaks: Sage, 2023 Available from: URL <https://cran.r-project.org/web/packages/car/index.html>.
- JUNIOR, R. d. O.; CONSTANTIN, J.; INOUE, M. H. Biologia e manejo de plantas daninhas. Curitiba, PR: Omnipax, p. 348, 2011.
- KLEINPAUL, J.A. et al. Productive traits of rye cultivars grown under different sowing seasons. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* v. 23, n.12, p. 937-44 , 2019.
- MELLO, A. C. et al. Nonlinear models in the height description of the Rhino sunflower cultivar. *Ciência Rural*, v. 52, n. 3, 2022.
- MISCHAN, M. M.; PINHO, S. Z. d. *Modelos não lineares: funções assintóticas de crescimento*. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2014. 184 p.
- MONQUERO, P. A.; CHRISTOFFOLETI, P. J. Banco de sementes de plantas daninhas e herbicidas como fator de seleção. *Bragantia*, v. 64, p. 203-209, 2005.
- PINHEIRO, J. et al. Linear and nonlinear mixed effects models. 2023. Available from: <https://cran.rproject.org/web/packages/nlme/index.html>.
- PRADO, T. K. L. et al. Study on the growth curve of the internal cavity of ‘Dwarf green’coconut fruits. *Revista Ciência Agronômica*, v. 51, n. 3, p. e20154591, 2020.
- R CORE TEAM. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2023. URL <https://www.R-project.org/>.
- SILVA, É. M. D. et al. Evaluation of the critical points of the most adequate nonlinear model in adjusting growth data of ‘green dwarf’coconut fruits. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v. 43, n. 1, p. e-726, 2021.
- SILVA, É. M. d. et al. Description of blackberry fruit growth by nonlinear regression models. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v. 42, n.2, p. e-177, 2020.
- SILVA E. M.et al. Método de Newton e Gauss-Newton na estimação dos parâmetros de modelo de regressão não linear. *Sigmae*, v. 8, n. 2, p. 728-734, 29 Jul. 2019.
- SOUSA, I.F. et al. Fitting nonlinear autoregressive models to describe coffee seed germination. *Ciência Rural*. v. 44, p. 2016-2021, 2014.
- TEIXEIRA, G. L. et al. Growth curves of campolina horses using nonlinear models. *Livestock Science*, Elsevier, v. 251, p. 104631, 2021.