

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS FREDERICO WESTPHALEN
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA
E TECNOLOGIA AMBIENTAL - PPGCTA**

CURVAS DE CRESCIMENTO NA CULTURA DA MUCUNA-ANÃ

Aluno: Jefferson Antonio Candaten

Orientador: Marcos Toebe

Frederico Westphalen-RS, setembro de 2023.

Jefferson Antonio Candaten

CURVAS DE CRESCIMENTO NA CULTURA DA MUCUNA-ANÃ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologia Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental**.

Orientador: Prof.º Dr. Marcos Toebe

**Frederico Westphalen-RS
2023**

Candaten, Jefferson Antonio
CURVAS DE CRESCIMENTO NA CULTURA DA MUCUNA-ANÃ /
Jefferson Antonio Candaten.- 2023.
40 p.; 30 cm

Orientador: Marcos Toebe
Coorientadora: Jaqueline Golombieski
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Campus de Frederico Westphalen, Programa de Pós
Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, RS, 2023

1. Curvas de crescimento 2. Modelos não-lineares de
Gompertz e Logístico 3. Adubações verde 4. Cobertura de
solo 5. Mucuna deeringiana Merr. I. Toebe, Marcos II.
Golombieski, Jaqueline III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSC. Dados fornecidos pelo
autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca
Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CPS 10/1728.

Declaro, JEFFERSON ANTONIO CANDATEN, para os devidos fins e sob as
penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de
curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações
necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão
devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte
dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro
grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente
declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade,
entre outras consequências legais.

Jefferson Antonio Candaten

CURVAS DE CRESCIMENTO NA CULTURA DA MUCUNA-ANÃ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologia Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental**.

Aprovada em 01 de setembro de 2023.

Prof. Dr. Marcos Toebe (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Prof. Dr. Volmir Sérgio Marchioro (UFSM)

Prof. Dr. Fernando Machado Haesbaert (UFT)

Frederico Westphalen-RS
2023

A Deus;
A minha esposa, Idelma da Silva;
A minha filha Helena da Silva Candaten;
Aos meus pais Jairo Candaten e Vera Tereza Candaten;
Dedico este trabalho!

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela dádiva da existência, pela proteção e amparo nos momentos de dificuldade e por me conceder mais uma experiência de evolução neste plano terreno.

A Universidade Federal de Santa Maria- *Campus Frederico Westphalen* e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologia Ambiental, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

A minha esposa, Idelma da Silva, e a minha filha, Helena da Silva Candaten, por todo o amor, carinho, compreensão, paciência e incentivo nos momentos em que necessitei me dedicar ao trabalho de pesquisa.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcos Toebe, por seus ensinamentos, conselhos e amizade durante o mestrado. Obrigado por oportunizar meu crescimento pessoal e profissional.

As professoras Jaqueline Ineu Golombieski e Hilda Hildebrand Soriani, pela amizade, pelos conselhos, pelo carisma e por ser exemplo para todos os seus alunos. Com elas aprendi a ser um professor melhor.

Aos amigos Felipe Pansanato Aguiar Cruz, Lucas de Mattos, Giovanna Angelina Machado e Anderson Chuquel Mello, pela parceria e auxílio prestado durante a realização do trabalho de campo e análises estatísticas.

Aos funcionários da Secretaria Integrada de Cursos de Pós-Graduação da UFSM-FW, Valdecir José dos Santos e Fernanda Buriol pelo auxílio em elucidar dúvidas durante o curso.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram de forma direta ou indireta, para a realização deste trabalho.

A todos, fica aqui meu muito obrigado!

“Agradeço todas as dificuldades que enfrentei. Não fosse por elas, eu não teria saído do lugar. As facilidades nos impedem de caminhar. Mesmo as críticas nos auxiliam muito”.

Chico Xavier

RESUMO

CURVAS DE CRESCIMENTO NA CULTURA DA MUCUNA-ANÃ

AUTOR: Jefferson Antonio Candaten

ORIENTADOR: Marcos Toebe

A mucuna-anã é uma planta da família Fabaceae que pode ser utilizada em sistemas de rotação e consorciação de culturas, na ciclagem de nutrientes e fixação biológica de nitrogênio, estudos ainda apontam para outras potencialidades na área de preservação e recuperação de áreas degradadas. Para que as pesquisas com a cultura avancem, faz-se necessário avaliar o comportamento de crescimento e desenvolvimento e a definição de protocolos experimentais para a avaliação da cultura. O objetivo deste trabalho foi caracterizar o crescimento de mucuna-anã, utilizando modelos não lineares. Para isso, dois ensaios de uniformidade foram realizados em épocas de semeadura diferentes. Em cada ensaio foram realizadas coletas semanais de seis plantas, estas foram pesadas para se obter os dados de massa fresca. A seguir, foi calculada a soma térmica acumulada e realizada a modelagem de massa fresca em função da soma térmica por meio dos modelos não-lineares de Gompertz e Logístico. Os dois modelos apresentaram bons indicadores de qualidade, contudo, o desempenho superior foi verificado no modelo logístico, que pode ser utilizado para caracterização das curvas de crescimento da mucuna-anã. A segunda época de semeadura apresentou maiores valores das estimativas dos parâmetros “a”, “b” e “c” dos modelos Logístico e Gompertz, sendo a época de maior crescimento da cultura.

Palavras-chave: *Mucuna deeringiana* Merr., Gompertz, Logístico, modelos não-lineares.

ABSTRACT**GROWTH CURVES IN THE CULTURE OF DWARF VELVET BEAN**

AUTHOR: Jefferson Antonio Candaten

ADVISOR: Marcos Toebe

The dwarf velvet bean is a plant of the Fabaceae family that can be used in crop rotation and intercropping systems, in nutrient cycling and biological nitrogen fixation, studies also point to other potentialities in the area of preservation and recovery of degraded areas. For research with the crop to advance, it is necessary to evaluate the behavior of growth and development and the definition of experimental protocols for the evaluation of the crop. The objective of this work was to characterize the growth of velvet bean, using non-linear models. For this, two uniformity tests were carried out at different sowing times. In each trial, weekly collections of six plants were carried out, these were weighed to obtain fresh mass data. Next, the accumulated thermal sum was calculated and the fresh mass was modeled as a function of the thermal sum using the non-linear models of Gompertz and Logistic. The two models showed good quality indicators, however, the superior performance was verified in the logistic model, which can be used to characterize the growth curves of the dwarf velvet bean. The second sowing date presented higher values of the estimates of the parameters “*a*”, “*b*” and “*c*” of the Logistic and Gompertz models, being the period of greater growth of the culture.

Keywords: *Mucuna deeringiana* Merr., Gompertz, Logistic, non-linear models.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 (A e B) - Sobreposição dos intervalos de confiança do parâmetro a para a primeira época de semeadura e para segunda época de semeadura, sucessivamente.....	29
FIGURA 2 (A e B) - Sobreposição dos intervalos de confiança do parâmetro b para a primeira época de semeadura e para segunda época de semeadura, sucessivamente.....	29
FIGURA 3 (A e B) – Sobreposição dos intervalos de confiança do parâmetro c para a primeira época de semeadura e para segunda época de semeadura, sucessivamente.....	29
FIGURA 4 (A e B) - Sobreposição dos intervalos de confiança do parâmetro a entre as épocas de semeadura (Logístico da primeira época x Gompertz da segunda) e (Gompertz da primeira época x Logístico da segunda), sucessivamente.....	30
FIGURA 5 (A e B) - Sobreposição dos intervalos de confiança do parâmetro b entre as épocas de semeadura (Logístico da primeira época x Gompertz da segunda) e (Gompertz da primeira época x Logístico da segunda), sucessivamente.....	30
FIGURA 6 (A e B) - Sobreposição dos intervalos de confiança do parâmetro c entre as épocas de semeadura (Logístico da primeira época x Gompertz da segunda) e (Gompertz da primeira época x Logístico da segunda), sucessivamente.....	30
FIGURA 7 - Comparação das curvas de crescimento dos modelos Gompertz e Logístico em razão da soma térmica para a primeira época de semeadura.....	34
FIGURA 8 - Comparação das curvas de crescimento dos modelos Gompertz e Logístico em razão da soma térmica para a segunda época de semeadura.....	34

LISTA DE TABELAS

TABELA 1- Estimativa dos parâmetros a , b e c , limite inferior (LI), Média (M) e limite superior (LS) do intervalo de confiança (IC95%), coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), critério de informação de Akaike (AIC), critério de informação bayesiano (BIC), medidas de curvatura intrínseca (IN) e medidas de curvatura de efeito de parâmetro (PE) dos modelos Logístico e Gompertz para os ensaios em função da soma térmica acumulada (STA) da <i>Mucuna-anã</i>	26
TABELA 2 - Comparação de valores do parâmetro a para a primeira época de semeadura.....	27
TABELA 3 - Comparação de valores do parâmetro a para a segunda época de semeadura.....	27
TABELA 4 – Comparação de valores do parâmetro b para a primeira época de semeadura.....	27
TABELA 5 – Comparação de valores do parâmetro b para a segunda época de semeadura.....	27
TABELA 6 - Comparação de valores do parâmetro c para a primeira época de semeadura.....	27
TABELA 7 – Comparação de valores do parâmetro c para a segunda época de semeadura.....	27
TABELA 8 - Comparação de valores do parâmetro a entre as épocas de semeadura (modelo Logístico da primeira época e relação ao Modelo Gompertz da segunda época).....	28
TABELA 9 - Comparação de valores do parâmetro a entre as épocas de semeadura (modelo Gompertz da primeira época em relação ao modelo Logístico da segunda época).....	28
TABELA 10 – Comparação de valores do parâmetro b entre as épocas de semeadura (modelo Logístico da primeira época em relação ao modelo Gompertz da segunda época).....	28
TABELA 11 - Comparação de valores do parâmetro b entre as épocas de semeadura (modelo Gompertz da primeira época em relação ao Logístico da segunda época).....	28

TABELA 12 – Comparação de valores do parâmetro c entre as épocas de semeadura (modelo Logístico da primeira época em relação ao modelo Gompertz da segunda época).....	28
TABELA 13 – Comparação de valores do parâmetro c entre as épocas de semeadura (modelo Gompertz da primeira época em relação ao modelo Logístico da segunda época).....	28

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 HIPÓTESES.....	17
3 OBJETIVOS	17
3.1 OBJETIVO GERAL.....	17
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
4.1 A CULTURA DA MUCUNA-ANÃ.....	17
4.2 CURVAS DE CRESCIMENTO	19
4.2.1 Modelo de Brody.....	21
4.2.2 Modelo de Modelo de Richards.....	21
4.2.3 Modelo de Von Bertalanffy	21
4.2.4 Modelo de Gompertz	22
4.2.5 Modelo Logístico.....	22
4.3 APLICAÇÕES DE MODELOS NÃO LINEARES.....	23
5 MATERIAIS E MÉTODOS	24
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
7 CONCLUSÃO.....	35
REFERÊNCIAS.....	35

1 INTRODUÇÃO

A adubação verde é uma prática agrícola muito antiga, utilizada há mais de 2000 anos, cujos primeiros usos foram registrados na China, Grécia e Itália, sobretudo para o aumento da produção das lavouras (TEODORO, 2018).

A prática de utilização de plantas de cobertura com o objetivo de melhorar a fertilidade do solo para o cultivo subsequente é denominada adubação verde. Essa prática causa alterações nas características físicas, químicas e biológicas do solo, trazendo benefícios à cultura subsequente. A adubação verde também contribui para a auto-suficiência do produtor em relação aos insumos externos utilizados para o incremento da fertilidade do solo (WUTKE et al., 2007). Com a prática da adubação verde é possível recuperar a fertilidade do solo proporcionando aumento do teor de matéria orgânica, da disponibilidade de macro e micronutrientes; formação e estabilização de agregados; melhoria da infiltração de água e aeração; diminuição da amplitude de variação térmica; controle dos nematóides e, no caso das leguminosas, incorporação ao solo do nitrogênio (IGUE, 1984 apud PFÜLLER et al., 2019). Como benefícios adicionais, a adubação verde com plantas de cobertura, evita a erosão e minimiza o surgimento de plantas daninhas (ALCÂNTARA et al., 2005).

Muitas pesquisas com adubação verde e plantas de cobertura, têm demonstrado grande potencial de proteção e recuperação da capacidade produtiva dos diferentes solos agrícolas. Apesar disso, um desafio se apresenta aos produtores: identificar quais esquemas de uso das variadas espécies são compatíveis com os sistemas de produção específicos de cada região e, se possível, dentro dos limites de cada propriedade, considerando os aspectos relacionados a clima, solo, infraestrutura da propriedade e condições socioeconômicas do agricultor (LIMA FILHO et al., 2023).

Segundo Souza et al. (2014), plantas adaptadas a servirem como adubação verde devem ser capazes de cobrir o solo rapidamente, proteger o mesmo dos agentes causadores da erosão, diminuir a temperatura na superfície e a evaporação da água, reciclar nutrientes das zonas mais profundas do perfil do solo para a superfície, romper as camadas compactadas e aumentar o teor de matéria orgânica no solo.

A adubação verde pode ser realizada com diversas espécies vegetais, porém a preferência pelas leguminosas está relacionada a inúmeras vantagens, dentre as quais, destaca-se a sua capacidade de fixar nitrogênio direto da atmosfera por simbiose com bactérias do gênero *Rhizobium* e *Bradyrhizobium* (TEODORO, 2018).

Dentre os adubos verdes mais utilizados destacam-se as espécies da família Fabaceae

(leguminosas) como crotalária (*Crotalaria ssp.*), feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), guandu (*Cajanus cajan*), leucena (*Leucaena ssp.*), lab-lab (*Dolichos lablab*) e mucuna (*Mucuna ssp.*) (SILVA et al., 2011). Espécies de plantas leguminosas apresentam alta especificidade biológica na fixação de nitrogênio e podem ser usadas como adubos verdes; elas apresentam alto potencial de acúmulo de nitrogênio e baixo teor de carbono (rápida mineralização da matéria orgânica), além de; promoverem ciclagem de nutrientes, principalmente nitrogênio (RODRIGUES et al., 2012; LIMA FILHO, 2023).

Mucunas são consideradas plantas melhoradoras dos solos. São plantas rústicas, efetivas controladoras da população de nematóides-formadores-de-galhas, com elevada capacidade de fixação de nitrogênio e de ciclagem de outros nutrientes. São muito tolerantes a solos ricos em alumínio e têm capacidade de competição com plantas indesejáveis, que são suprimidas por sombreamento ou efeito alelopático positivo (LIMA FILHO, 2023).

A mucuna-anã (*Mucuna deeringiana* (Bort) Merrill) é uma leguminosa de hábito de crescimento herbáceo que produz entre 10 a 20 toneladas de massa verde, 2 a 4 toneladas de massa seca e fixa entre 60 a 120 kg de nitrogênio por ha/safra (FORMENTINI et al., 2008). Seu sistema radicular é vigoroso, do tipo “pivotante”, bem desenvolvido em profundidade, conferindo à planta resistência nos períodos prolongados de seca. É péssima hospedeira de nematóides formadores de galhas, podendo ser cultivada exclusivamente em rotação com milho e olerícolas ou intercaladas às culturas perenes, frutíferas e mandioca (TEODORO, 2018; VARGAS-AYALA et al., 2000).

Tendo em vista a importância ambiental da cultura, torna-se necessário desenvolver pesquisas buscando a obtenção da modelagem de crescimento mais precisos visando a aplicação de manejos, acompanhamento do desenvolvimento das plantas e adequação de delineamentos experimentais (ALVES et al., 2013; FERNANDES et al., 2014).

Curvas de crescimento têm diversas aplicações de suma importância na área biológica. Para descrever curvas de crescimento, um método quantitativo eficiente é o do uso de modelos de regressão (CARVALHO, 1996). Para representar o crescimento de indivíduos de uma população biológica, ou de estruturas desses indivíduos, os pesquisadores podem utilizar dois métodos de regressão: a regressão linear ou a regressão não linear.

Os modelos de regressão linear fazem parte de um conjunto de ferramentas cujo foco é a realização de inferências, na maior parte das vezes, causais. A inferência consiste em, a partir de evidências encontradas para uma amostra, realizar generalizações de resultados para a população. Há um interesse em verificar a correlação entre duas ou mais variáveis e testar o quanto se pode confiar nas estimativas encontradas (CHEIN, 2019).

Os modelos lineares são modelos em que todas as derivadas parciais em relação a um parâmetro do modelo não dependem de nenhum parâmetro. A resposta de interesse, usualmente representada por Y depende somente de uma variável independente, representada por X (DE BEM, 2017). Por sua natureza, a regressão linear analisa apenas relações lineares entre variáveis dependentes e independentes. Isto é, pressupõe que existe uma relação direta entre eles. Às vezes isso está incorreto. Atualmente um crescente número de pesquisadores acredita que as relações entre as variáveis biológicas são melhores descritas por funções não lineares (CUNHA, 2011). Segundo Hess et al., (2015), os modelos não lineares de crescimento apresentavam dificuldades para o ajuste devido à complexidade e à quantidade de cálculo interativo, mas se popularizaram atualmente com a implementação dos algoritmos em softwares computacionais específicos e avançados.

A análise de dados através do modelo clássico de regressão, também denominado modelo normal linear, é uma das técnicas mais usadas de estimação. Porém, em muitas situações práticas, algumas de suas suposições, como a normalidade e a linearidade nos parâmetros, não são satisfeitas. Este fato alavancou o desenvolvimento de novas técnicas estatísticas para os modelos de regressão, surgindo então, os modelos de regressão não linear (MATTOS, 2013).

Nos modelos não lineares, são modelos em que pelo menos uma das derivadas parciais dependem de algum parâmetro e não existe transformação capaz de torná-lo linear. Esses modelos são caracterizados por apresentar gráficos na forma de curva de crescimento (DE BEM, 2017). A aplicação de modelos não lineares para a descrição de curvas de crescimento, bem como de seus pontos críticos, proporciona maior conhecimento da cultura. É importante definir as curvas de crescimento a fim de permitir o correto manejo cultural, permitindo identificar ao longo do ciclo da cultura fatores que atuam negativamente na produtividade, buscando explicar e entender como os fatores ambientais influenciam no desenvolvimento das plantas em locais específicos (ROSA et al., 2010; MELLO et al., 2022).

Desta forma, estudos voltados à modelagem de crescimento da cultura da mucuna-anã na região noroeste do Rio Grande do Sul, podem ser otimizadores para a tomada de decisão de pesquisadores diante da adequação de métodos de condução e avaliação de experimentos, bem como auxiliar os profissionais da área e pesquisadores a tomar decisões de manejo e uso referente a mucuna-anã.

2 HIPÓTESES

Os modelos não-lineares de Gompertz e Logístico são concordantes e podem ser utilizados na predição do crescimento da cultura da mucuna-anã. As curvas de crescimento diferem em função da época da semeadura.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Caracterizar o crescimento de mucuna-anã, utilizando modelos não lineares.

3.2 Objetivos Específicos

Ajustar os modelos Gompertz e Logístico para a avaliação do crescimento de mucuna-anã em épocas de semeadura e verificar se as estimativas dos parâmetros diferem entre os modelos e entre as épocas de semeadura.

Utilizar as estimativas dos parâmetros dos modelos para inferir sobre o crescimento e manejo da cultura.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 A cultura da mucuna-anã

A mucuna (*Mucuna spp.*) é uma planta da família fabaceae, tem crescimento rápido e produz grande quantidade de massa verde para cobertura do solo. Além disso, algumas espécies de mucuna, como a mucuna-cinza (*Mucuna cinereum*) e a mucuna-anã (*Mucuna deeringiana*), podem evitar a multiplicação de nematóides fitoparasitas que causam grandes danos às culturas (SAKAI et al., 2007).

A mucuna-anã (*Mucuna deeringiana* Merr.) é uma leguminosa de hábito de crescimento herbáceo, cujo ciclo, do plantio ao pleno florescimento, é de 90 a 120 dias. Ela produz entre 10 a 20 toneladas de massa verde, 2 a 4 toneladas de massa seca e fixa entre 60 a 120 kg de nitrogênio por ha/safra. É uma planta própria para consórcios com culturas plantadas em espaçamentos menores uma vez que não tem hábito trepador, não competindo

assim por luz (FORMENTINI et al., 2008). No Brasil, pode ser encontrada nas regiões Centro-Oeste, Sul e Sudeste (semeada na primavera/verão), e nas regiões Norte e Nordeste (semeada o ano todo) (CALEGARI; DONIZETE CARLOS, 2014). Pode ser semeada em linhas e em cultivo consorciado. Seu sistema radicular é vigoroso, do tipo “pivotante”, bem desenvolvido em profundidade, conferindo à planta resistência nos períodos prolongados de seca. É péssima hospedeira de nematóides formadores de galhas, podendo ser cultivada exclusivamente em rotação com milho e olerícolas ou intercaladas às culturas perenes, frutíferas, mandioca, como alternativa aos fertilizantes químicos nitrogenados (TEODORO, 2018; ÁVILA et al., 2020; LIMA FILHO, 2023).

Segundo Sakai et al. (2007) e Ambrosano et al. (2016), em estudos de fertilidade de solo, constataram que a presença do adubo verde constituído por mucunas, provocou incremento significativo na soma de bases, aumento de cálcio e magnésio e, conseqüentemente, os tratamentos com espécies de mucuna (incluindo a mucuna-anã) apresentaram maiores valores de CTC (capacidade de troca de cátions). A presença de ácidos orgânicos na massa vegetal pode ser a causa dessa mudança. Observou-se, também, um acréscimo na acidez potencial da testemunha, sem leguminosa como adubo verde. Na comparação entre os dois anos do experimento verificou-se também, que a produção de massa verde da parte aérea da mucuna-anã obteve um acréscimo significativo.

Sobre o desempenho de quiabeiro consorciado com adubos verdes, verificou-se a viabilidade da utilização da crotalária e da mucuna-anã para esse consórcio. No entanto, em relação ao manejo, a crotalária é mais interessante pela facilidade de corte. A mucuna-anã apresenta melhores resultados na supressão das plantas espontâneas nas entrelinhas dos tratamentos, visto que houve redução do número de capinas na cultura do quiabeiro consorciado (TIVELLI et al., 2013).

Para Jesus et al. (2014), a mucuna-anã também se mostrou eficiente em relação à cobertura do solo, com elevado potencial de cobertura a partir dos 30 DAE (dias após emergência). Apresentou ainda ótima eficiência no controle das plantas espontâneas aos 45 DAE. Nesse caso, o potencial de cobertura contribuiu significativamente para os resultados.

Em pesquisa sobre o consórcio de mucuna-anã e milho, Alcântara et al. (2005), obteve resultados positivos nos atributos físicos do consórcio e na fertilidade do solo, além disso, houve uma minimização de plantas invasoras e erosão. No entanto, os autores salientam que a mucuna-anã deve ser semeada 15 dias após o milho, para evitar competição. Essa situação é atestada por Ambrosano et al. (2014), que obtiveram resultados de rendimento de cana-planta

(toneladas/hectare) menores com os tratamentos nos quais se plantou a leguminosa (mucuna-anã) consorciada nas entrelinhas. Nesse caso, a mucuna-anã apresentou concorrência com a cana-de-açúcar em sua fase inicial de crescimento.

Em trabalho sobre caracterização de espécies de *Mucuna* quanto a produtividade de fitomassa, extração de nutrientes e seus efeitos nos atributos do solo, Ambrosano et al. (2016) utilizou quatro espécies de mucuna, sendo a mucuna-anã, cinza, preta e verde. Segundo o autor, todas as espécies são recomendadas para fins de adubação verde.

A mucuna-anã apresenta-se como uma ótima alternativa para cobertura de solo, ciclagem de nutrientes, rotação de culturas, fixação biológica de nitrogênio, melhoramento da fertilidade do solo, recuperação de áreas degradadas, controle de nematóides fitoparasitas e supressão de plantas espontâneas.

4.2 Curvas de crescimento

A mucuna-anã é uma cultura de relevante interesse agropecuário, principalmente no que tange práticas agroecológicas. Essa cultura ainda necessita de mais estudos sobre a caracterização do crescimento, sendo estes fundamentais, para se tomar decisões acertadas no seu uso em boas práticas ambientais.

Do ponto de vista agrônomo, fisiológico e biológico, a análise de crescimento pode ser utilizada para conhecer diferenças funcionais e estruturais entre cultivares de uma mesma espécie, favorecendo a seleção de materiais superiores dentro de um programa de melhoramento genético (BENINCASA, 1988 apud BARBERO, 2013). A análise de crescimento é um método que descreve as condições morfofisiológicas da planta em diferentes intervalos de tempo, entre duas amostragens sucessivas, e se propõe acompanhar a dinâmica da produção fotossintética, avaliada por meio do acúmulo de matéria seca (BENINCASA, 1988 apud BARBERO et al., 2013). O método também pode ser usado para a investigação do efeito de fenômenos ecológicos sobre o crescimento, como adaptabilidade de espécies em ecossistemas diversos, efeito de competição, diferenças genotípicas da capacidade produtiva e influência de práticas agrônomicas sobre o crescimento (GOMIDE, 1997 apud BARBERO et al., 2013). Em outras palavras, a análise de crescimento permite avaliar o desenvolvimento das plantas e inferir sobre os processos fisiológicos envolvidos nas respostas das plantas a estímulos diversos (BARBERO et al., 2013).

Conhecer o padrão de crescimento e desenvolvimento de uma cultura e seus principais

indicadores via modelos não lineares é fundamental para a definição de práticas culturais e escolha do momento adequado de semeadura (BUSSAB; MORETTIN, 2011). A modelagem matemática é uma ferramenta importante para caracterizar o crescimento e o desenvolvimento de plantas, além de, o estudo de curvas de crescimento gerar estratégias para semeaduras futuras, adequando o manejo (MANGUEIRA et al., 2016; STRECK et al., 2008).

Modelos matemáticos são conjuntos de ferramentas que nos permitem apresentar matematicamente processos do mundo real. Eles são desenvolvidos para se aproximar ao máximo da realidade, permitindo-nos compreender melhor e até mesmo tentar uma possível modificação. São excelentes instrumentos para fazer estimativas através de pesquisa, verificação e interpretação. No entanto, exigem informações consistentes para garantir que o resultado se aproxime o máximo possível da realidade (MÁXIMO, 2023).

Os modelos não lineares são os mais utilizados para descrição de curvas de crescimento. Eles são mais econômicos e possuem parâmetros com interpretação prática e biológica (SOUSA et al., 2014; ARCHONTOULIS; MIGUEZ, 2015). As funções não lineares mais utilizadas na descrição de curvas de crescimento são as de Richards, Gompertz, von Bertalanffy, Brody e Logística (MAZZINI et al., 2003). Alguns destes modelos são sigmóides, ou seja, apresentam curva em formato de “S”, o que os torna mais adequados para descrever curvas de crescimento, pois segundo Mischan e Pinho (2014), o crescimento dos seres vivos apresenta um comportamento distinto, iniciando lentamente, passando para uma fase exponencial e tendendo a estabilizar no final.

Uma curva descreve uma sequência de medidas de uma determinada espécie, principalmente peso, altura e diâmetro em função do tempo. A principal vantagem dos modelos não lineares é o resumo das informações contidas nos dados em alguns parâmetros de interpretação biológica (DE BEM, 2017a). Todos os modelos não lineares mais conhecidos (Brody, Gompertz, Logístico, Von Bertalanffy) são assintóticos, mas diferem quanto ao comportamento da taxa de crescimento. No modelo Brody, a taxa de crescimento decai constantemente, dando ao modelo um aspecto não sigmóide. Já nos modelos de Gompertz, Von Bertalanffy e Logístico a taxa de crescimento começa lenta, atinge um pico e volta a cair, dando um aspecto sigmóide à curva (SABER, 2003; WILD, 2003 apud SARI, 2018).

4.2.1 Modelo de Brody

No modelo Brody $w(t) = a[1 - b \cdot e^{-kt}]^m + \varepsilon_i$, o parâmetro “ m ” assume o valor **um**. Nesse modelo, “ $w(t)$ ” é o peso na idade “ t ”, “ a ” representa o peso adulto, “ k ” é o índice de maturidade ou velocidade de crescimento, “ b ” é a constante de integração, “ m ” é o parâmetro que dá forma à curva, “ t ” é o tempo e “ ε ” é o erro aleatório associado a cada pesagem. Este modelo considera a velocidade do crescimento proporcional à taxa de crescimento que fica por realizar. Assim, as taxas de crescimento diminuem à medida que aumentam o peso e a idade. É um modelo interessante para descrever o crescimento após o ponto de inflexão ou de auto inibição do crescimento (SANTOS, 2019).

4.2.2 Modelo de Richards

O Modelo de Richards $w(t) = a[1 - b e^{-kt}]^m + \varepsilon_i$, foi originalmente desenvolvido para avaliar o crescimento de plantas. Nesse modelo, “ $w(t)$ ” é o peso na idade “ t ”, “ a ” representa o peso adulto, “ k ” é o índice de maturidade ou velocidade de crescimento, “ b ” é a constante de integração, “ m ” é o parâmetro que dá forma à curva, “ t ” é o tempo e “ ε ” é o erro aleatório associado a cada pesagem. Ele foi baseado no modelo de Von Bertalanffy. A função de Richards é considerada por muitos pesquisadores como o modelo de crescimento mais completo, pois possui quatro parâmetros, apesar disso, é um modelo difícil de ser ajustado, principalmente pela alta correlação negativa entre “ b ” e “ m ” (SANTOS, 2019).

4.2.3 Modelo de Von Bertalanffy

O modelo proposto por Ludwig Von Bertalanffy, $w(t) = a[1 - b e^{-kt}]^m + \varepsilon_i$ é um modelo não linear que apresenta o formato sigmoidal não simétrico em relação ao ponto de inflexão. O modelo foi utilizado na área ecológica para modelar o crescimento de peixes em função do tempo. Nesse modelo, “ $w(t)$ ” é o peso na idade “ t ”, “ a ” representa o peso adulto, “ k ” é o índice de maturidade ou velocidade de crescimento, “ b ” é a constante de integração, “ m ” é o parâmetro que dá forma à curva, “ t ” é o tempo e “ ε ” é o erro aleatório associado a cada pesagem. Para Bertalanffy, o valor de “ m ” = 2/3 é oriundo de uma relação alométrica do peso com a área corporal do peixe. No entanto, o autor afirma que para mamíferos esta taxa metabólica corresponde a aproximadamente 3/4 do peso. Esse modelo baseia-se na suposição

de que o crescimento é a diferença entre as taxas de anabolismo e catabolismo do animal (SANTOS, 2019; FERNANDES, 2019).

4.2.4 Modelo de Gompertz

O modelo de Gompertz é uma equação diferencial que descreve o crescimento exponencial limitado de uma população ou sistema. Embora inicialmente tenha sido desenvolvido para o estudo da dinâmica populacional, o modelo de Gompertz também tem aplicações em outras áreas, incluindo a matemática educacional e biologia (MÁXIMO, 2023).

A função de Gompertz $y_i = ae^{-e^{(b-c*x_i)}} + \varepsilon_i$, foi desenvolvida por Benjamin Gompertz, sendo um modelo matemático relativo a séries temporais, onde o crescimento é menor no começo e no fim do período temporal, nela “a”, “b” e “c” são parâmetros e “x” é o tempo. Tem sido bastante utilizada no estudo do crescimento de animais e vegetais. É uma função invariavelmente crescente e fica entre duas assíntotas horizontais: o eixo das abscissas e a reta de ordenada e^a . Pelo seu constante uso é necessário que se estudem suas características dentro das várias áreas de aplicação (CARVALHO, 1996).

4.2.5 Modelo Logístico

A função logística, definida por $y_i = \frac{a}{1+e^{(b-c*x_i)}} + \varepsilon_i$, onde “a”, “b” e “c” são parâmetros, foi indicada para o estudo descritivo do crescimento de populações humanas por Verhulst (1845). Muitos anos depois, Pearl e Reed (1920), obtiveram empiricamente a mesma curva, que utilizaram para descrever o crescimento da população dos Estados Unidos, de 1790 a 1910. A partir daí, a curva logística tem sido bastante estudada quanto às suas características matemáticas e quanto aos métodos de estimar seus parâmetros. Ela tem sido largamente empregada para a representação de dados de crescimento de animais, vegetais e de populações (CARVALHO, 1996).

4.3 Aplicações de modelos não lineares

Aplicações dos modelos não lineares para descrição de curvas de crescimento e desenvolvimento de plantas, frutos e outros seres vivos estão amplamente disponíveis na literatura (MELLO et al., 2022). Ajustes de modelos não lineares foram utilizados para descrever o crescimento de frutos do cafeeiro (FERNANDES et al., 2017), frutos do cacauzeiro (MUNIZ et al., 2017; SILVA; SAVIAN, 2019), frutos do pessegueiro (FERNANDES et al., 2022; PINZÓN-SANDOVAL et al., 2021), frutos da amora preta (SILVA et al., 2020), frutos do cajueiro (MUIANGA et al., 2016), frutos do pequizeiro (RIBEIRO et al., 2018a), do fruto coco (PRADO et al., 2020; SILVA et al., 2021), frutos da pereira (RIBEIRO et al., 2018b), frutos da manga (FERNANDES et al., 2021) frutos da ameixeira (CUNHA, 2011), germinação de *Brachiaria brizantha* (MACHADO et al., 2023), diâmetro da cana-de-açúcar (JANE et al., 2020), diâmetro do cedro (FRÜHAUF et al., 2020), de caracteres morfológicos e produtivos da crotalária (DE BEM et al., 2017b; DE BEM et al., 2020), do tomate-cereja (LÚCIO et al., 2016), crescimento da planta de pinhão-manso (MIRANDA et al., 2021), do girassol (ZOBIOLE et al., 2010; MELLO et al., 2022), da pimenta biquinho (MANGUEIRA; SILVA; MARTINS, 2022), do crescimento de plantas de mandioca submetidas a doses de potássio (SILVA et al., 2017), da massa fresca da alface (CARINI et al., 2020), entre outros.

Para as plantas, na maioria das bibliografias citadas, os modelos não lineares que mais se adequaram ou que foram testados e avaliados como satisfatórios para demonstrar o crescimento, foram os modelos Logístico e Gompertz, sendo o modelo Logístico o que mais se ajustou aos dados das pesquisas.

Modelos não lineares também são utilizados para descrever o crescimento de animais, como; na descrição do crescimento de fêmeas da raça guzerá (OLIVEIRA et al., 2000), em estimativas no crescimento de frangos (GUIMARÃES, 2000), na produção animal (FREITAS, 2005; FREITAS, 2007), no crescimento de vacas de corte (SILVA et al., 2011), no crescimento em bovinos da raça nelore (EVANGELISTA et al., 2022), previsibilidade de crescimento em cavalos Mangalarga Marchador (SOUZA et al., 2022), entre outros.

Para animais, na maioria das bibliografias citadas, os modelos não lineares que mais se adequaram ou que foram testados e avaliados como satisfatórios para demonstrar o crescimento, foram os modelos Von Bertalanffy e Brody.

5 MATERIAL E MÉTODOS

Foram conduzidos dois ensaios de uniformidade (experimentos sem tratamentos) com a cultura de mucuna-anã na área experimental da UFSM – FW. A área experimental é localizada na latitude 27° 23' 44" S, longitude 53° 25' 34" W e altitude de 490 m, em Latossolo distroférico típico (SANTOS et al., 2018) e o clima é caracterizado por Köppen como Cfa (ALVARES et al., 2013).

Cada ensaio teve duas linhas de semeadura de 35 metros de comprimento. Cada linha tinha 100 covas com duas plantas por cova, perfazendo 200 plantas por linha (400 plantas totais por canteiro). O espaçamento entre linhas foi de 0,65 m e entre plantas de 0,35 m. A semeadura foi realizada em 18/11/2021 para a primeira época e 17/12/2021 para a segunda época, sendo feita de forma manual e sem a utilização de fertilizantes.

Desde a fase inicial da cultura foram delimitadas seis regiões de coletas de plantas. A seguir, semanalmente foram coletadas e avaliadas seis plantas por coleta, das quais foram mensuradas as massas frescas.

Todos os tratamentos culturais foram realizados uniformemente na área experimental. Não foram realizados controles químicos de plantas daninhas nem de doenças. A limpeza da área foi realizada por meio físico através de capina. Também não foram empregados fertilizantes químicos, orgânicos ou biológicos. As coletas de plantas e pesagem foram realizadas semanalmente utilizando balança digital de precisão com 0,01g de precisão.

O experimento foi avaliado até a fase fisiológica de floração da cultura. Nesse período de avaliação foram coletados os registros de temperatura horária do ar, em °C, da Estação Meteorológica Automática do INMET, localizada a aproximadamente 300 m da área experimental. Com os dados de temperatura calculou-se a soma térmica diária conforme a equação: $STd = (T0h + T1h + \dots + T23h) / 24 - Tb$ (1) onde STd é a soma térmica diária e Tb é a temperatura basal inferior da mucuna-anã, nesse estudo considerada como 10°C. A seguir, foi calculada a soma térmica acumulada (STA) por meio da soma das STd do período entre a emergência das plantas e o final das avaliações em cada época.

Para o ajuste dos modelos Gompertz e Logístico, foram utilizados os valores das seis plantas de cada avaliação em função da soma térmica acumulada (STA). A equação utilizada do modelo Gompertz foi: $y_i = ae^{-e^{(b-c*x_i)}} + \epsilon_i$, e a do Logístico foi: $y_i = \frac{a}{1+e^{(b-c*x_i)}} + \epsilon_i$, em que y_i representa a i-ésima observação da variável dependente sendo $i = 1, 2, \dots, n$; a é o valor assintótico ou valor de crescimento final; b é o parâmetro de alocação da curva, não

possuindo interpretação biológica, mas fundamental para o formato sigmoidal da curva; c é a taxa máxima de crescimento relativo ou índice de precocidade; e x é a variável independente.

As estimativas iniciais dos parâmetros foram realizadas pelo método dos mínimos quadrados ordinários. A comparação entre os modelos foi realizada adotando-se o critério de sobreposição dos intervalos de confiança das estimativas dos parâmetros de cada modelo. A avaliação de qualidade de ajuste dos modelos foi realizada com base nos seguintes indicadores: coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), sendo o melhor ajuste o que apresenta maior valor de R^2_{aj} ; critério de informação de Akaike (AIC), onde o melhor modelo é o que apresenta o menor valor de AIC.

Foram avaliadas também as medidas de não linearidade das curvaturas de Bates e Watts (1988), em que a não linearidade é decomposta em não linearidade intrínseca (IN) e não linearidade do efeito do parâmetro (PE), com base no conceito geométrico de curvatura. Assim, o modelo escolhido foi aquele que apresentou os menores valores de IN e PE.

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do software estatístico R (R Development Core Team, 2020) e do aplicativo Microsoft Office Excel®.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ambos os modelos, Gompertz e Logístico, foram úteis para demonstrar o crescimento da cultura da *Mucuna-anã* para as épocas de semeadura do experimento (Figuras 7 e 8). Para todas as situações não é possível verificar diferença entre os modelos Logístico e Gompertz ao observar isoladamente o R^2_{aj} , pois os valores são semelhantes, variando de 0,9891 a 0,9979, o que mostra que ambos os modelos se ajustam a todas as situações. Segundo Mello et al. (2022), isso ressalta a necessidade de utilizar mais de um critério para comparação.

A diferenciação pode ser feita observando os demais avaliadores. O modelo Logístico apresentou os menores valores de AIC, BIC, NI e PE para os dois ensaios, reforçando esse modelo como o melhor a ser utilizado na variável da massa fresca da *Mucuna-anã* (Quadro 1), e também, no comportamento das curvas sobre os dados (Figura 7 e 8).

Em relação à comparação dos modelos Gompertz e Logístico, Prado et al. (2020), verificaram que os avaliadores da qualidade do ajuste foram bastante semelhantes, ou seja, ambos os modelos apresentaram valores altos para o ajuste coeficiente de determinação R^2_{aj} e valores baixos para o critério de Akaike (AIC), similar ao presente estudo. Para Jane et al. (2020) os modelos Gompertz, Logístico e von Bertalanffy se ajustaram bem aos dados de crescimento de cana-de-açúcar da variedade B92579. A exceção foi o modelo Brody, que

obteve parâmetros não significativos na análise de altura. O Gompertz e o Logístico obtiveram os maiores valores R_2 e os mais baixos valores de AIC, indicando que são os mais adequados para descrever a altura e o diâmetro do caule, respectivamente.

Tabela 1. Estimativa dos parâmetros a , b e c , limite inferior (LI), Média (M) e limite superior (LS) do intervalo de confiança (IC95%), coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), critério de informação de Akaike (AIC), critério de informação bayesiano (BIC), medidas de curvatura intrínseca (IN) e medidas de curvatura de efeito de parâmetro (PE) dos modelos Logístico e Gompertz para os ensaios em função da soma térmica acumulada (STA) da Mucuna-anã.

		Época 01		Época 02	
		Logístico	Gompertz	Logístico	Gompertz
a	LI	465,2789	547,1617	735,3530	811,8464
	M	515,6000 bB	675,4000 aB	794,5000 bA	943,9000 aA
	LS	583,2280	928,1512	877,6916	1202,1280
b	LI	5,6257	2,3600	7,2216	3,2688
	M	6,2820 aB	2,7850 bB	8,1590 aA	4,0890 bA
	LS	7,0814	3,3543	9,3236	5,1158
c	LI	0,0044	0,0017	0,0058	0,0026
	M	0,0052 aB	0,0023 bB	0,0067 aA	0,0035 bA
	LS	0,0060	0,0030	0,0079	0,0046
	R^2_{aj}	0,9903	0,9891	0,9977	0,9979
	AIC	161,7729	164,0771	103,2218	105,0307
	BIC	165,5506	167,8549	105,1614	106,9703
	IN	0,1029	0,1504	0,1052	0,1414
	PE	0,7260	2,6367	0,9221	2,5498

Fonte: Autor.

*Letras minúsculas comparam os modelos Logístico e Gompertz dentro de cada época de semeadura. Letras maiúsculas comparam as estimativas dos parâmetros do modelo entre as épocas de semeadura.

Foram verificadas diferenças significativas na análise dos intervalos de confiança dos parâmetros a , b e c dos modelos Logístico e Gompertz entre si e dentro das épocas de semeadura, para cada modelo (Quadro 1, Tabelas 1 a 12). As diferenças (Figuras 1 a 6) indicam que os modelos diferem entre si e também dentro (entre as épocas de semeadura), rejeitando a hipótese inicial de que os modelos não-lineares de Gompertz e Logístico são concordantes e que ambos podem ser utilizados na predição do crescimento da cultura da mucuna-anã. Contudo, aceitam a hipótese de que as curvas de crescimento diferem em função da época da semeadura.

Tabela 2- Comparação de valores do parâmetro a para a primeira época de semeadura.

Modelos	LI	M	LS
Logístico	465,2789	515,6000	583,2280
Gompertz	547,1617	675,4000	928,1512

Fonte: Autor.

Tabela 3 - Comparação de valores do parâmetro a para a segunda época de semeadura.

Modelos	LI	M	LS
Logístico	735,3530	794,5000	877,6916
Gompertz	811,8464	943,9000	1202,12

Fonte: Autor.

Tabela 4 – Comparação de valores do parâmetro b para a primeira época de semeadura.

Modelos	LI	M	LS
Logístico	5,6257	6,2820	7,0814
Gompertz	2,3600	2,7850	3,3543

Fonte: Autor.

Tabela 5 – Comparação de valores do parâmetro b para a segunda época de semeadura.

Modelos	LI	M	LS
Logístico	7,2216	8,1590	9,3236
Gompertz	3,2688	4,0890	5,1158

Fonte: Autor.

Tabela 6- Comparação de valores do parâmetro c para a primeira época de semeadura.

Modelos	LI	M	LS
Logístico	0,0044	0,0052	0,0060
Gompertz	0,0017	0,0023	0,0030

Fonte: Autor.

Tabela 7 – Comparação de valores do parâmetro c para a segunda época de semeadura.

Modelos	LI	M	LS
Logístico	0,0058	0,0067	0,0079
Gompertz	0,0026	0,0035	0,0046

Fonte: Autor.

Tabela 8- Comparação de valores do parâmetro a entre as épocas de semeadura (modelo Logístico da primeira época e relação ao Modelo Gompertz da segunda época).

Modelos	LI	M	LS
Logístico 1°	465,2789	515,6000	583,2280
Gompertz 2°	811,8464	943,9000	1202,1280

Fonte: Autor.

Tabela 9 - Comparação de valores do parâmetro a entre as épocas de semeadura (modelo Gompertz da primeira época em relação ao modelo Logístico da segunda época).

Modelos	LI	M	LS
Gompertz 1°	547,1617	675,4000	928,1512
Logístico 2°	735,3530	794,5000	877,6916

Fonte: Autor.

Tabela 10 – Comparação de valores do parâmetro b entre as épocas de semeadura (modelo Logístico da primeira época em relação ao modelo Gompertz da segunda época).

Modelos	LI	M	LS
Logístico 1°	5,6257	6,2820	7,0814
Gompertz 2°	3,2688	4,0890	5,1158

Tabela 11 - Comparação de valores do parâmetro b entre as épocas de semeadura (modelo Gompertz da primeira época em relação ao Logístico da segunda época).

Modelos	LI	M	LS
Gompertz 1°	2,3600	2,7850	3,3543
Logístico 2°	7,2216	8,1590	9,3236

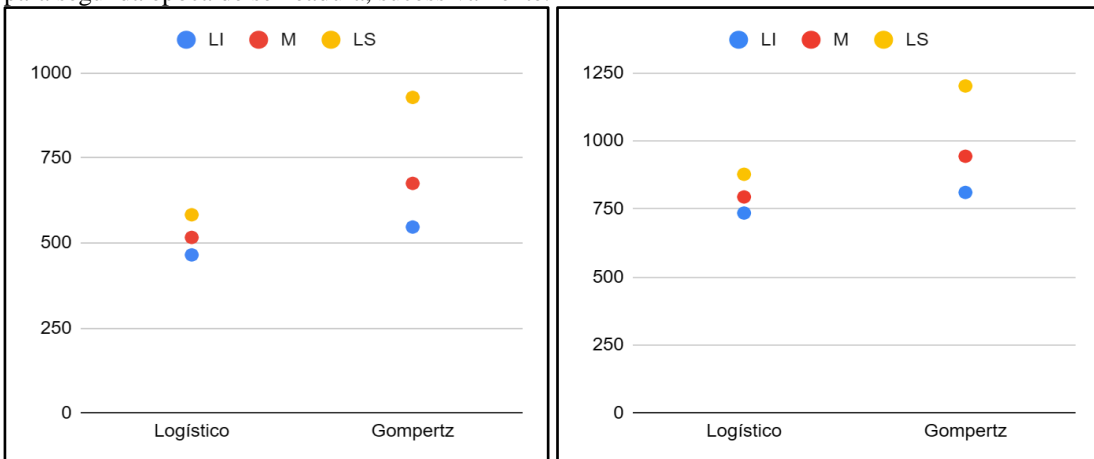
Tabela 12 – Comparação de valores do parâmetro c entre as épocas de semeadura (modelo Logístico da primeira época em relação ao modelo Gompertz da segunda época).

Modelos	LI	M	LS
Logístico 1°	0,0044	0,0052	0,0060
Gompertz 2°	0,0026	0,0035	0,0046

Tabela 13 – Comparação de valores do parâmetro c entre as épocas de semeadura (modelo Gompertz da primeira época em relação ao modelo Logístico da segunda época).

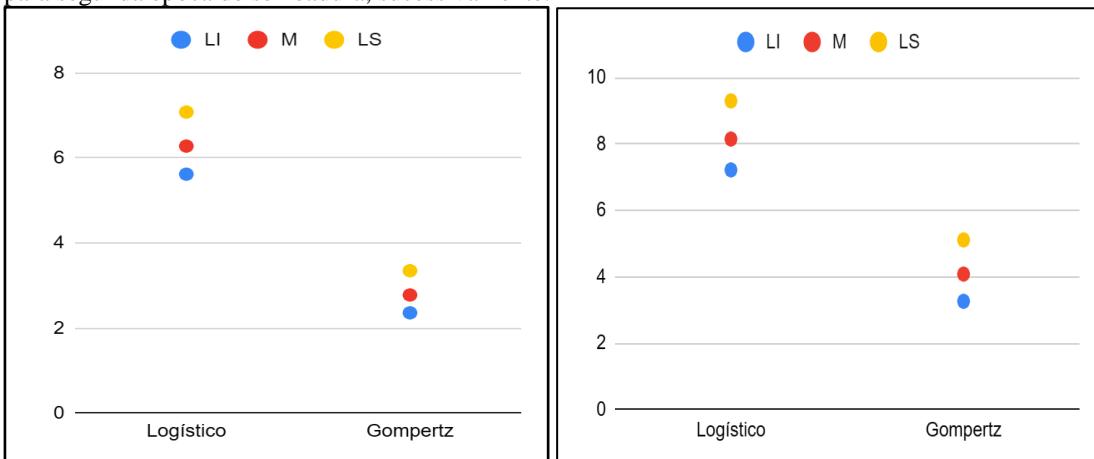
Modelos	LI	M	LS
Gompertz 1°	0,0017	0,0023	0,0030
Logístico 2°	0,0058	0,0067	0,0079

Figuras 1A e 1B. Sobreposição dos intervalos de confiança do parâmetro a para a primeira época de semeadura e para segunda época de semeadura, sucessivamente.



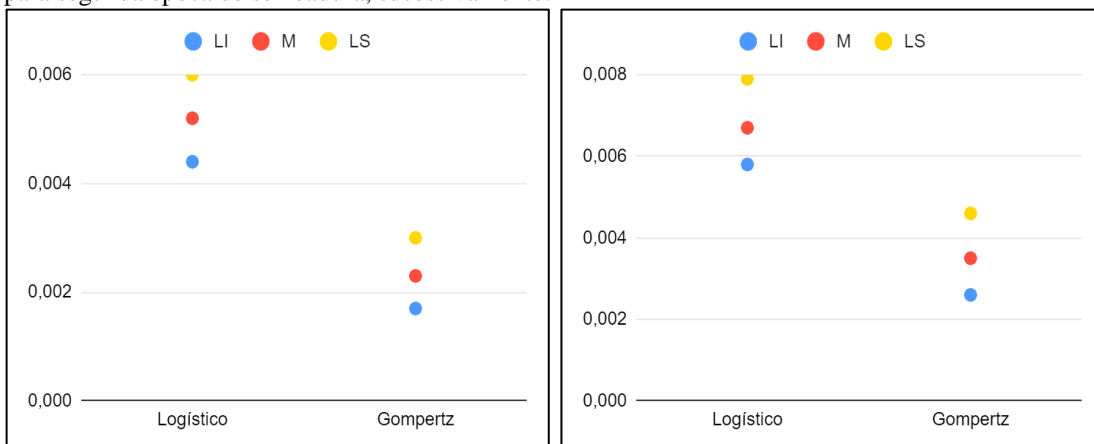
Fonte: Autor.

Figuras 2A e 2B. Sobreposição dos intervalos de confiança do parâmetro b para a primeira época de semeadura e para segunda época de semeadura, sucessivamente.



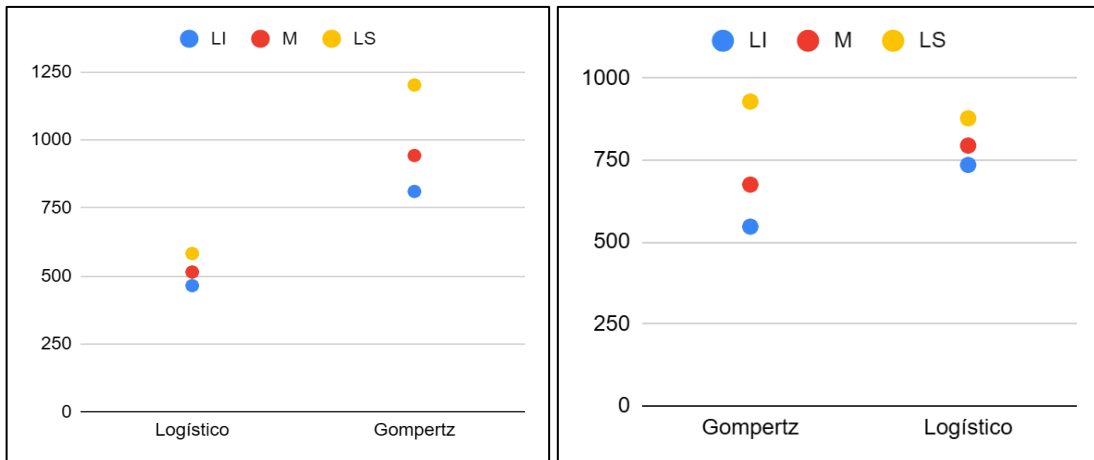
Fonte: Autor.

Figuras 3A e 3B. Sobreposição dos intervalos de confiança do parâmetro c para a primeira época de semeadura e para segunda época de semeadura, sucessivamente.



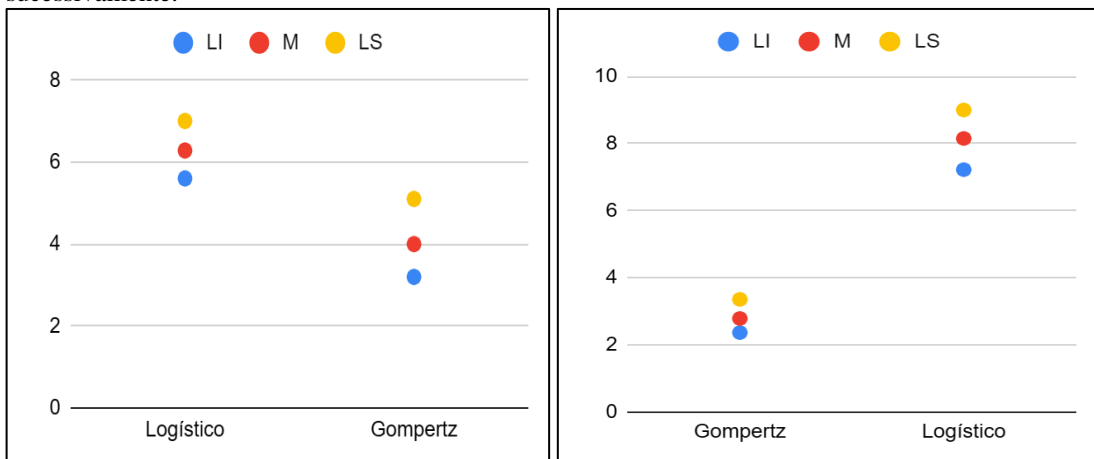
Fonte: Autor.

Figuras 4A e 4B. Sobreposição dos intervalos de confiança do parâmetro a entre as épocas de semeadura (Logístico da primeira época x Gompertz da segunda) e (Gompertz da primeira época x Logístico da segunda), sucessivamente.



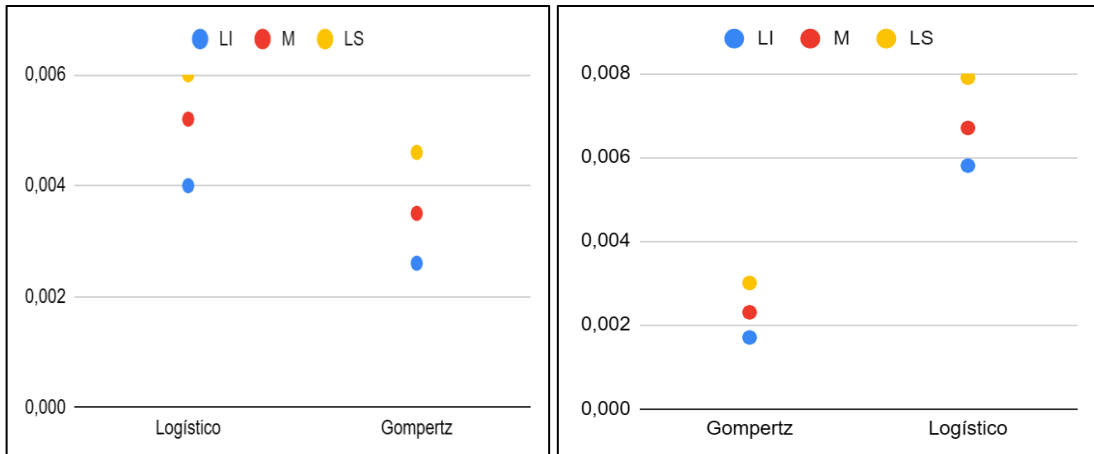
Fonte: Autor.

Figuras 5A e 5B. Sobreposição dos intervalos de confiança do parâmetro b entre as épocas de semeadura (Logístico da primeira época x Gompertz da segunda) e (Gompertz da primeira época x Logístico da segunda), sucessivamente.



Fonte: Autor.

Figuras 6A e 6B. Sobreposição dos intervalos de confiança do parâmetro c entre as épocas de semeadura (Logístico da primeira época x Gompertz da segunda) e (Gompertz da primeira época x Logístico da segunda), sucessivamente.



Fonte: Autor.

O modelo de Gompertz apresentou nas duas épocas de semeadura maiores valores de a e menores valores de b e c . Entre as épocas de semeadura, a segunda para ambos os modelos, apresentou maiores valores de a , b e c em relação à primeira época de semeadura (Quadro 1).

A variável a representa o valor assintótico da variável dependente, b é um parâmetro de localização, importante para manter a forma sigmoideal do modelo e associado à abcissa do ponto de inflexão, c está relacionado com a taxa de crescimento, quanto maior o valor do parâmetro c , menor o tempo necessário para atingir a assíntota (a) (MELLO et al., 2022).

Os indicadores de qualidade revelam que o modelo Logístico foi superior, embora ambos tenham elevados indicadores e poderiam ser recomendados. Outros autores também consideram o modelo logístico superior para determinada cultura.

Para Mello et al. (2022), os modelos Gompertz e Logístico também mostraram diferenças entre os ensaios. O modelo Logístico apresentou melhor qualidade de ajuste, sendo o mais adequado para caracterizar a curva de crescimento da cultura de girassol em altura.

Segundo Ribeiro et al. (2020 b), ao compararem os modelos Logístico e Gompertz, concluíram que, o desenvolvimento do fruto da pera da cultivar ‘Shinseiki’ é melhor descrito por modelos não lineares de regressão, e particularmente pelo Modelo Logístico.

Muniz et al. (2017), ao compararem os modelos de Gompertz e Logístico para estimar a curva de crescimento dos parâmetros (comprimento, diâmetro e volume) do cacau, consideraram o modelo Logístico como o mais eficiente na descrição do crescimento do fruto. Em estudos sobre o padrão de crescimento do fruto do cafeeiro, considerando o acúmulo de massa fresca em função do tempo, pode-se verificar que o crescimento foi duplo sigmoideal.

Os modelos Gompertz e Logístico se mostraram adequados para descrever tal curva de crescimento, com uma superioridade do modelo duplo Logístico (FERNANDES et al., 2017).

Segundo Frühauf et al. (2021), ao testarem três modelos de crescimento, sendo o linear polinomial de 3º grau, não lineares Logístico e Gompertz, concluiu que todos os modelos testados foram adequados para descrever o crescimento em altura das plantas de feijoeiro cv. BRS MG Talismã ao longo dos dias após a emergência, sendo o modelo Logístico o que melhor se adequou aos dados.

Prado et al. (2020), ao compararem o modelo Logístico e Gompertz, também consideraram o modelo Logístico como o mais adequado para descrever o crescimento da cavidade de frutos de coco ‘verde anão’ durante sua pesquisa.

Para Carini et al. (2020) os modelos Logístico e Gompertz apresentaram ajuste satisfatório para as massas de matéria fresca e seca de cultivares de alface Gloriosa, Pira

Verde e Stella, no período de outono-inverno, sendo o modelo Logístico aquele que melhor descreve o crescimento das cultivares de alface.

Para alguns autores, outros modelos não lineares de crescimento concorrem em qualidade com o modelo Logístico.

Em pesquisa com amoreiras, os modelos Gompertz e Logístico descreveram de forma satisfatória os dados de crescimento das cultivares, sendo escolhido o modelo Logístico para as cultivares Brazos e Guarani e o Gompertz para as cultivares Tupy e Choctaw (SILVA et al., 2020).

Fernandes et al. (2022), ao descreverem a curva de crescimento do fruto do pessegueiro “Aurora 1”, consideraram que, os modelos Brody (B), Gompertz (G) e Logístico (L), apresentam boa qualidade de ajuste aos dados de altura e diâmetro do fruto, visto que apresentaram valores de índice de ajuste da assíntota (IA) próximos de um e baixos valores do desvio padrão residual (DPR) e de medidas de não linearidade. No entanto, é importante destacar que os modelos Gompertz e Logístico apresentaram a melhor qualidade de ajuste e podem ser preferidos para descrever o crescimento em altura e diâmetro dos frutos de pêssego.

Para Lúcio et al. (2016), os modelos de regressão não-linear de crescimento Logístico e de von Bertalanffy descrevem satisfatoriamente o comportamento do peso médio de frutos, do número médio de frutos e do número médio de cachos colhidos de tomate-cereja, cultivado em estufa plástica.

Cunha (2011), ao testar três modelos de crescimento; Linear polinomial, Logístico e Gompertz para descrever o desenvolvimento do fruto da ameixeira, também considerou os modelos Logístico e Gompertz como melhores para descrever o crescimento dos frutos ao longo do tempo.

Existem também pesquisas em que o modelo logístico não se apresenta como a melhor opção. Embora, possa também ser utilizado.

Ribeiro et al. (2018 a), consideraram, que os modelos Gompertz e Logístico apresentaram bons indicadores de qualidade de ajuste, com Gompertz sendo o modelo o mais adequado para descrever variáveis, diâmetro da seção transversal, diâmetro longitudinal e massa fresca do fruto do pequi. Já os modelos Von Bertalanffy e Brody não apresentaram bom ajuste.

Para Silva e Savian (2019), o modelo Logístico, o modelo Gompertz e o modelo de Chanter mostraram-se adequados para descrever o comprimento e diâmetro do fruto do cacau ao longo do tempo; porém o melhor foi o Modelo Chanter.

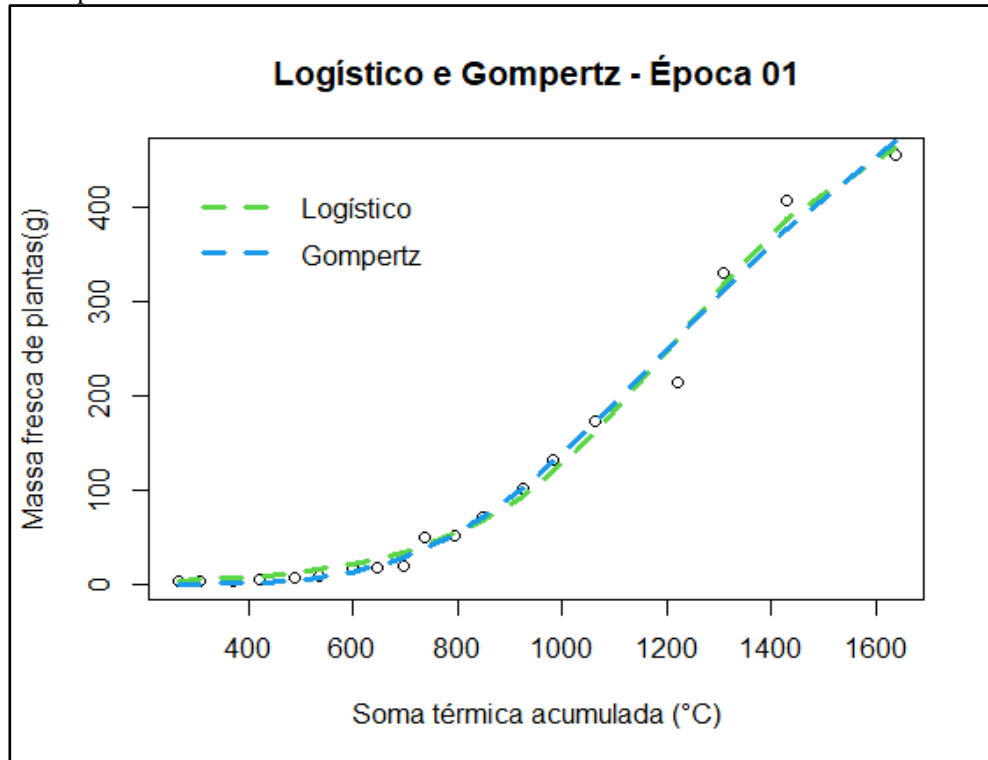
Frühauf et al. (2020) ao testarem quatro modelos não lineares (Brody, Gompertz, Logístico e Von Bertalanffy), concluíram que todos modelos testados foram adequados para descrever o crescimento do cedro (*Cedrela fissilis*) agrupado em classes de idade, no entanto, o modelo Brody foi o que melhor aderiu os dados, devido à presença de autocorrelação residual, o parâmetro autorregressivo de primeira ordem (ϕ_1) foi incluído, o que garantiu maior precisão nas estimativas.

De acordo com o ajuste dos modelos Logístico, Gompertz e von Bertalanffy ao dados de altura da planta de pimenta tipo biquinho sob estresse hídrico, o modelo Von Bertalanffy foi o mais adequado, considerando as estatísticas do AIC e BIC (MANGUEIRA; SILVA; MARTINS, 2022).

Machado et al. (2023), em estudo sobre ajuste dos modelos não-lineares para descrever a germinação de sementes de brachiaria, testaram os modelos Gompertz, Logístico, Von Bertalanffy e Brody. Com base nos resultados dos avaliadores de qualidade de ajuste dos modelos, o modelo Gompertz apresenta melhores valores, ou seja, maior R_2 e menores valores de DPR e AIC.

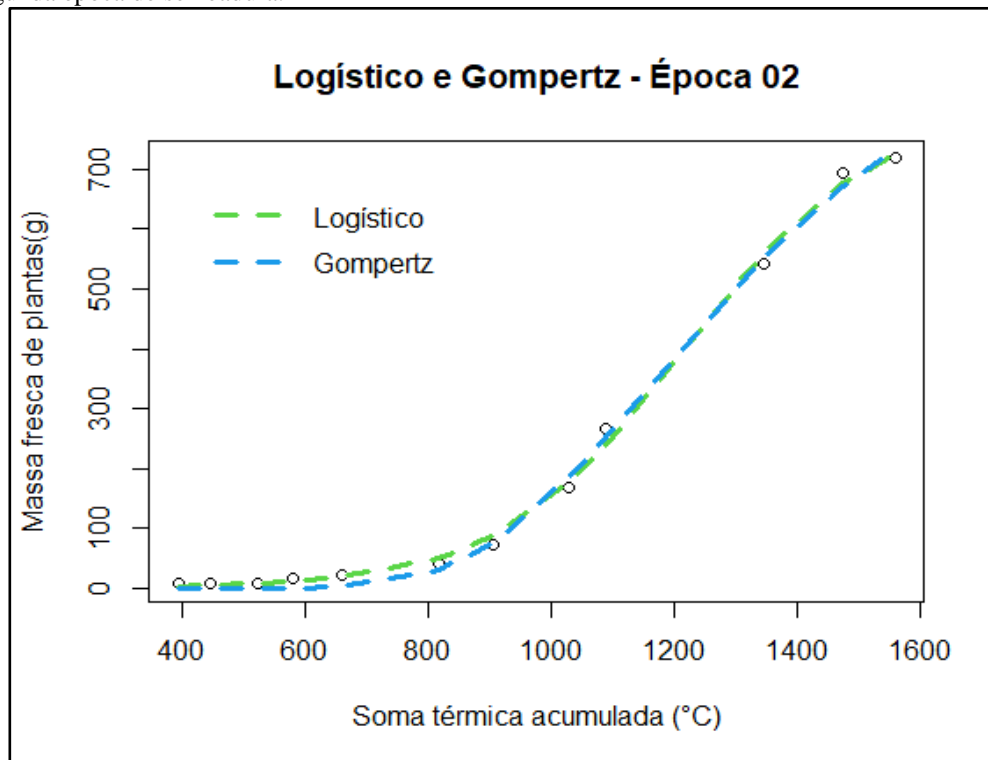
Isto demonstra que, para cada cultura existe um modelo de curva de crescimento que melhor se ajusta. No caso da Mucuna-anã, o modelo que melhor se ajustou às duas épocas de semeadura, considerando os dois modelos testados (Gompertz e Logístico), foi o Modelo Logístico.

Figura 7. Comparação das curvas de crescimento dos modelos Gompertz e Logístico em razão da soma térmica para a primeira época de semeadura.



Fonte: Autor.

Figura 8. Comparação das curvas de crescimento dos modelos Gompertz e Logístico em razão da soma térmica para a segunda época de semeadura.



Fonte: Autor.

7 CONCLUSÕES

Os modelos de crescimento Gompertz e Logístico diferem entre si e entre as épocas de semeadura.

Os dois modelos apresentaram bons indicadores de qualidade, contudo, o desempenho superior foi verificado no modelo logístico, que pode ser utilizado para caracterização das curvas de crescimento da mucuna-anã.

A segunda época de semeadura apresentou maiores valores das estimativas dos parâmetros a , b e c dos modelos Logístico e Gompertz, sendo a época de maior crescimento da cultura.

REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA, F. A.; CASTELO BRANCO, M.; MELO, P. E.; COSTA DOS SANTOS, R. Consórcio de milho e mucuna-anã visando ao manejo sustentável do solo em área de agricultura urbana. **Boletim de pesquisa e desenvolvimento**. Brasília: Embrapa Hortaliças, 13 p. 2005.

ALVARES, C. A et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 1, p. 711–728, 2013.

ALVES, R.R.; SALOMÃO, L.C.C.; SIQUEIRA, D.L., CECON, P.R.; SILVA D.F.P. Desenvolvimento do maracujá doce em Viçosa, **Rev. Ceres**, v. 60, n. 1, p. 127-133, 2013.

AMBROSANO, E. J.; WUTKE, E. B.; SALGADO, G. C.; ROSSI, F.; DIAS, F. L. F.; TAVARES, S.; OTSUK, I. P. Caracterização de cultivares de Mucuna quanto a produtividade de fitomassa, extração de nutrientes e seus efeitos nos atributos do solo. **Cadernos de Agroecologia** – ISSN 2236-7934 – V. 11, N. 2, 2016.

ARCHONTOULIS, S. V.; MIGUEZ, F. E. Nonlinear regression models and applications in agricultural research. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 2, p. 786-798, 2015.

ÁVILA, J. S et al. Green manure, seed inoculation with *Herbaspirillum seropedicae* and nitrogen fertilization on maize yield. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v.24, n.9, p.590-595, 2020.

BARBERO, L. M.; PRADO, T. F.; BASSO, K.B.; LIMA, L. A.; MOTTA, K. M.; KRUGER, B. C.; MARTINS NETO, L. R. ; SILVA, G. A. S. Análise de crescimento em plantas forrageiras aplicada ao manejo de pastagens. **Vet.Not.**, Uberlândia, v.19. n.2, p.71-85 jul./dez. 2013.

- BUSSAB, W.O.; MORETTIN, P.A. **Estatística básica**. 7.ed. São Paulo: Saraiva, 2011. 540p.
- CALEGARI, A.; DONIZETE CARLOS, J. A. Recomendações de plantio e informações gerais sobre o uso de espécies para adubação verde no Brasil. In: **Adubação Verde e Plantas de Cobertura no Brasil**. Fundamentos e Prática. Volume 2. Chapter 27; p. 451-477, 2014.
- CARINI, F. et al. Nonlinear models for describing lettuce growth in autumn-winter. **Ciência Rural**, v.50, n.7, 2020.
- CARVALHO, L. R de. **Métodos para comparação de curvas de crescimento**. Tese de Doutorado. 176 pag. Universidade Estadual Paulista, 1996.
- CHEIN, F. **Introdução aos modelos de regressão linear: um passo inicial para compreensão da econometria como uma ferramenta de avaliação de políticas públicas**. 76 p. Brasília: Enap, 2019.
- CUNHA, L. S. **Modelos de regressão para descrição do crescimento dos frutos da ameixeira**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Lavras, 2011.
- DE BEM, C. M. **Modelos de crescimento na cultura de crotalária juncea**. Tese de doutorado, p. 102, UFSM, 2017 a.
- DE BEM et al. Growth models for morphological traits of sunn hemp. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 38, n. 5, p. 2933-2944, set./out. 2017 b.
- DE BEM et al. Univariate and multivariate nonlinear models in productive traits of the sunn hemp. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 51, n. 1, e20196673, 2020.
- EVANGELISTA et al. Fit and genetic parameters of the growth curve of Polled Nellore cattle. **Rev. Bras. Saúde Prod. Anim.**, Salvador, v.23, p. 01 - 16. 2022.
- FERNANDES, F. A. **Modelo de von Bertalanffy para a descrição do crescimento de Mamíferos de Corte**. Dissertação (mestrado acadêmico), 62p. Universidade Federal de Lavras, 2019.
- FERNANDES, F. A. et al. Utilização de modelos não lineares na descrição do crescimento de frutos de manga da variedade palmer. **Alimentos, nutrição e saúde**. Ponta Grossa, Cap. 9, p. 109-116. Editora Atena. 2021.
- FERNANDES, J. G. et al. Description of the peach fruit growth curve by diphasic sigmoidal nonlinear models. **Rev. Bras. Frutic**. Jaboticabal, v. 44, n. 3: (e-875), 2022.
- FERNANDES, T. J.; PEREIRA A.A.; MUNIZ, J.A.; Double sigmoidal models describing the growth of coffee berries. **Ciência Rural**, v.47, n.8, Santa Maria, 2017.

FERNANDES, T. J.; PEREIRA A.A.; MUNIZ, J.A.; SAVIAN, T.V. Seleção de modelos não lineares para a descrição das curvas de crescimento do fruto do cafeeiro. **Coffee Science**, v. 9, n. 2, p. 207-215, abr./jun. 2014.

FORMENTINI, E. A.; LÓSS, F. R.; BAYERL, M. P.; LOVATI, R. D.; BAPTISTI, E. **Cartilha sobre adubação verde e compostagem**. INCAPER, Vitória- ES, 2008.

FREIRAS, A. R de. Curvas de Crescimento na Produção Animal. **R. Bras. Zootec.**, v.34, n.3, p.786-795, 2005.

FREIRAS, A. R de. Estimativa de curva de crescimento na produção animal. **Embrapa Pecuária Sudeste**, 2007.

FRÜHAUF, A. C.; ASSIS-PEREIRA, G.; BARBOSA, A. C. M. C.; FERNANDES, T. J.; MUNIZ, J. A. 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 4-11, 2020.

FRÜHAUF, A. C.; SILVA, E. M.; FERNANDES, T. J.; MUNIZ, J. A. Predição do desenvolvimento em altura de plantas de feijoeiro por meio de modelos não lineares e polinomial. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, V.13, N.3, p.572-582, set. 2021.

GUIMARÃES, D. P. Um modelo de passo invariante baseado na função de Gompertz para prognose do crescimento. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.35, n.1, p.75-81, jan. 2000.

HESS et al. Aplicação dos modelos lineares generalizados para estimativa do crescimento em altura. **Pesq. flor. bras.**, Colombo, v. 35, n. 84, p. 427-433, out./dez. 2015.

JANE, S. A.; MUNIZ, J. A.; SILVA, E. M. Adjusting the growth curve of sugarcane varieties using nonlinear models. **Rev. Ciênc. Agron.**, v. 51, n. 4, e20196660, p. 1–10, 2020.

JESUS, A. C de. et al. Eficiência da mucuna-anã (*Stizolobim deeringianum*) na supressão de plantas espontâneas. **IV Semana Acadêmica de Ciências Agrárias**. Universidade Estadual do Maranhão. 2014.

LIMA FILHO, O. F de. **Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil : fundamentos e prática**. 2. ed. rev. atual. Brasília, DF : Embrapa, 2023.

LÚCIO et al. Modelos não-lineares para a estimativa da produção de tomate do tipo cereja. **Ciência Rural**, v.46, n.2, fev, 2016.

MACHADO et al. Ajuste de modelos não lineares para descrever a germinação de sementes de *Brachiaria brizantha* cv. marandu. **Revista Foco**. Curitiba (PR), v.16, n.6, p.01-16, 2023.

MANGUEIRA, R. A. F.; SILVA, V. F.; MARTINS, W. A. Description of the growth curve of the biquinho-type pepper plant under water stress. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v.44, e17, 2022.

MATTOS, T. B. **Modelos não lineares e suas aplicações**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2013.

MÁXIMO, K. A. M. Compreendendo o Modelo Gompertz e suas aplicações. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**. São Paulo, v.9.n.03. mar. 2023.

MAZZINI, A. R. A. Análise de curvas de crescimento de machos hereford. **Ciênc. agrotec.**, Lavras. V.27, n.5, p.1105-1112, set./out., 2003

MELLO et al. Nonlinear models in the height description of the Rhino sunflower cultivar. **Ciência Rural**, v.52, n.3, 2022.

MIRANDA et al. Nonlinear models to describe the growth of *Jatropha* plant (*Jatropha curcas* L.). **Revista Ciência Agronômica**, v. 52, n. 4, e20207602, 2021.

MISCHAN, M. M.; PINHO, S. Z. **Modelos não lineares: funções assintóticas de crescimento**. 1. ed. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2014. 184 p.

MUIANGA et al. Descrição da curva de crescimento de frutos do cajueiro por modelos não lineares. **Rev. Bras. Frutic.** Jaboticabal - SP, v.38, n. 1. 022-032, Fevereiro 2016.

MUNIZ et al. Nonlinear models for description of cacao fruit growth with assumption violations. **Rev. Caatinga**. Mossoró, v. 30, n. 1, p. 250 – 257, jan. – mar., 2017

OLIVEIRA, H. N. de; LÔBO, R. B.; PEREIRA, C. S. Comparação de modelos não lineares para descrever o crescimento de fêmeas da raça guzerá. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.35, n.9, p.1843-1851, set. 2000.

PFÜLLER, E. E., BUENO SANTOS, D., FERREIRA AIRES, R. E GALEANO SAMANIEGO, M.P. Aspectos fenológicos e produtividade de espécies de verão para cobertura de solo em Vacaria, RS. **Investig. Agrar**. 21(1):23-30, 2019.

PINZÓN-SANDOVAL, E. H., PINEDA-RÍOS, W., SERRANO-CELY, P. Mathematical models for describing growth in peach (*Prunus persica* [L.] Batsch.) fruit cv. Dorado. **Rev. Colomb. Cienc. Hortic**. Vol. 15 - No. 3, e13259, September-December 2021.

PRADO et al. Study on the growth curve of the internal cavity of 'Dwarf green' coconut fruits. **Revista Ciência Agronômica**, v. 51, n. 3, e20154591, 2020.

RAMOS, A. R.; FELISBERTO, P.; TIMOSSI, P. C.; COSTA NETTO, A. P. Características agronômicas da mucuna-preta em diferentes épocas de sementeira. **Revista de Ciências Agrárias**, 41(4): 1051-1058, 2018.

RIBEIRO, T. D. et al. Description of the growth of pequi fruits by nonlinear models. **Rev. Bras. Frutic.** Jaboticabal, v. 40, n. 4: (e-949), 2018a.

RIBEIRO, T. D. et al. The use of the nonlinear models in the growth of pears of 'Shinseiki' cultivar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.48: 01, e20161097, 2018b.

RODRIGUES, G. B.; SÁ, M. E. de; VALÉRIO FILHO, W. V.; BUZETTI, S.; BERTOLIN, D. C.; PINA, T. P. Matéria e nutrientes da parte aérea de adubos verdes em cultivos exclusivos e consorciados. **Revista Ceres**, v.59, p.380-385, 2012.

ROSA, V.G.C.; MOREIRA, M.A., RUDORFF, F.T.; ADAMI, M. Estimativa da produtividade de café com base em um modelo agrometeorológico espectral. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, n.12, p.1478-1488, 2010.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing.** Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2020.

SAKAI et al. Avaliação agronômica de quatro espécies de mucuna utilizadas como adubos verdes em sistema agroecológico. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v.2, n.1, fev. 2007.

SANTOS et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 5. ed., rev. e ampl. 356 p. color. Brasília, DF : Embrapa, 2018.

SANTOS, A. L. P. **Métodos Geradores de Modelos de Crescimento e Decrescimento Aplicados às Ciências Agrárias.** Tese de Doutorado. 70p. Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2019.

SARI, B. G. **Parâmetros Biológicos da Produção de Tomateiro via Modelo Logístico.** Tese de Doutorado. 125 pag. UFSM, 2018.

SILVA, A. G. de B. et al. Desempenho agronômico de mucuna-verde em diferentes arranjos espaciais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira.** Brasília, v. 46, n. 6, p. 603- 608, jun. 2011.

SILVA, D. C. O. et al. Curvas de crescimento de plantas de mandioca submetidas a doses de potássio. **Rev Cienc. Agrar.**, v. 60, n. 2, p. 158-165, abr./jun. 2017.

SILVA, E. M. et al. Description of blackberry fruit growth by nonlinear regression models. **Revista Brasileira de Fruticultura.** Jaboticabal, v. 42, n. 2: (e-177), 2020.

SILVA, E. M. et al. Evaluation of the critical points of the most adequate nonlinear model in adjusting growth data of 'green dwarf' coconut fruits. **Rev. Bras. Frutic.**, Jaboticabal., v. 43, n. 1: (e-726). 2021.

SILVA, F. L de. Curvas de crescimento em vacas de corte de diferentes tipos biológicos. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.46, n.3, p.262-271, mar. 2011.

SILVA & SAVIAN. Chanter model: nonlinear modeling of the fruit growth of cocoa. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.49:11, e20190409, 2019.

SOUZA, F. A. C. et al. Growth predictability models in Mangalarga Marchador horses. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.52:4, e20210161, 2022.

SOUZA, L. da S.; SOUZA, L. D.; CARVALHO, J. E. B. de. Adubação verde na física do solo. In: LIMA FILHO, O. F. de; AMBROSANO, E. J.; ROSSI, F.; CARLOS, J. A. D. (Ed.). **Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e prática**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. v. 1, p. 335-370.

STRECK, N. A.; BOSCO, L. C.; LUCAS, D. D. P.; LAGO, I. Modeling leaf appearance in cultivated rice and red rice. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 5, p 559-567, 2008.

TEODORO, M. S. **Adubação verde nos tabuleiros litorâneos do Piauí**. Teresina : Embrapa Meio-Norte, 2018.

TEODORO, R. B.; OLIVEIRA, F. L.; SILVA, D. M. N.; FÁVERO, C.; QUARESMA, M. A. L. Aspectos agronômicos de leguminosas para adubação verde no cerrado do alto vale do Jequitinhonha. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 635-643, 2011.

TIVELLI SW; KANO C; PURQUERIO LFV; WUTKE EB; ISHIMURA I. Desempenho do quiabeiro consorciado com adubos verdes eretos de porte baixo em dois sistemas de cultivo. **Horticultura Brasileira** 31: 483-488, 2013.

VARGAS-AYALA et al. Shifts in Soil Microflora Induced by Velvetbean (*Mucuna deeringiana*) in Cropping Systems to Control Root-Knot Nematodes. **Biological Control**,17, 11–22, 2000.

WUTKE, E.B.; AMBROSANO, E.J.; et. al. **Bancos comunitários de sementes de adubos verdes: Informações técnicas**. Brasília, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2007, 52p.

ZOBIOLE et al. Curva de crescimento, estado nutricional, teor de óleo e produtividade do girassol híbrido brs 191 cultivado no estado do Paraná. **Rev. bras. ol. fibros.**, Campina Grande, v.14, n.2, p.55-62, maio/ago. 2010.