

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

DANIELLE ESTANISLAU COELHO SILVA

**NONLINEAR MODELS TO DESCRIBE THE GROWTH CURVES OF
TESTICULAR AND MORPHOMETRIC TRAITS OF MANGALARGA
MARCHADOR STALLIONS**

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2020

DANIELLE ESTANISLAU COELHO SILVA

**NONLINEAR MODELS TO DESCRIBE THE GROWTH CURVES OF
TESTICULAR AND MORPHOMETRIC TRAITS OF MANGALARGA
MARCHADOR STALLIONS**

Dissertação apresentada a Universidade Federal de Viçosa como parte das exigências do programa de Pós-graduação em Medicina Veterinária, para obtenção do título *Magister Scientiae*.

Orientador: José Domingos Guimarães

Coorientador: Jurandy Mauro Penitente-Filho

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2020

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S586n
2020
Silva, Danielle Estanislau Coelho, 1995-
Nonlinear models to describe the growth curves of testicular
and morphometric traits of Mangalarga Marchador stallions /
Danielle Estanislau Coelho Silva. – Viçosa, MG, 2020.
88 f. : il. ; 29 cm.

Texto em português e inglês.

Orientador: José Domingos Guimarães.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Manga-larga (Cavalo). 2. Testículos - Crescimento.
3. Morfometria. 4. Modelos não-lineares (Estatística).
I. Universidade Federal de Viçosa. Centro de Ciências
Biológicas e da Saúde. Programa de Pós-Graduação em
Medicina Veterinária. II. Título.

CDD 22. ed. 636.1083

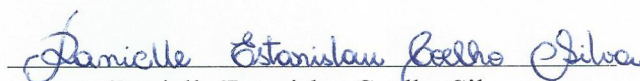
DANIELLE ESTANISLAU COELHO SILVA

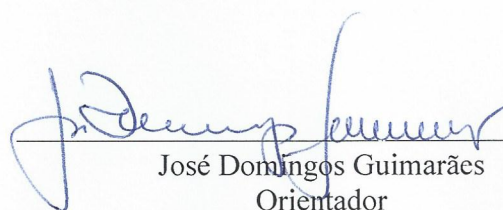
NONLINEAR MODELS TO DESCRIBE THE GROWTH CURVES OF
TESTICULAR AND MORPHOMETRIC TRAITS OF MANGALARGA
MARCHADOR STALLIONS

Dissertação apresentada a Universidade
Federal de Viçosa como parte das
exigências do programa de Pós-Graduação
em Medicina Veterinária, para obtenção do
título *Magister Scientiae*.

APROVADA: 27 de fevereiro de 2020

Assentimento:


Danielle Estanislau Coelho Silva
Autora


José Domingos Guimarães
Orientador

*A Deus
e aos anjos que ele colocou nesse caminho.*

AGRADECIMENTOS

Primeiro, agradeço a Deus, pois Ele me permitiu acordar todos os dias para ir em busca de meus objetivos, colocando em meu caminho oportunidades e obstáculos que me fizeram ir além dos meus limites para, agora, aproveitar dessa sensação de missão cumprida.

A minha vó Sirlei, meu anjo da guarda, e a tia Tereza, minha estrela guia, sempre presentes com suas auras de amor, tranquilidade, (muita) saudade e, claro, felicidade pelo caminho trilhado e a vitória conquistada.

Aos meus pais, Renan e Rosânea, que me educaram com o melhor que puderam oferecer, me ensinaram o valor das conquistas, confiaram em mim e me deram todo o apoio que precisei para alcançar esse objetivo. Sei que se esforçaram muito e sou imensamente grata a Deus por vocês na minha vida.

A tia Meire, minha segunda mãe, sempre perto com seu amor, conselhos e brincadeiras durante as ligações ou as idas para casa, afim de me tranquilizar e me fazer ver que esse caminho é incrível, apesar dos obstáculos. Um exemplo de mulher que admiro muito e me inspirou nesse processo de amadurecimento.

Aos meus irmãos, Renato e Arthur, pela sua amizade, cuidado, aceitação, apoio, companheirismo, cumplicidade, bagunças e implicâncias (sei que é a forma que demonstram o quanto me amam).

A tia Elaine, que esteve perto de todos nós como apoio e, mesmo com seu jeito doidinha de ser, nos dando conforto diante de toda a situação em nossa casa. Agora mais pertinho ainda, nos alegrando quase todos os dias com seu jeito atrapalhado, mas sempre amigável e vibrante.

As demais pessoinhas amáveis das minhas famílias Coelho (incluindo a Andreia e a Lourdinha como membros ativos da nossa família), Estanislau e Martins, por todos os momentos juntos, todos os abraços apertados na chegada e na despedida e por todas as palavras de motivação e conforto.

As minhas amigas, minhas irmãs de coração: Carol, Mari, Larissa e Roziany, além do tio Dani, por tudo. As conversas, os sorrisos, os abraços, a presença, as aventuras e experiências, as dicas, a admiração, as comidas, os inúmeros cafés, os apelidos ... exatamente tudo! Todas colaboraram para me manter firme nesse caminho e, principalmente, para expandir minha mente e minha visão, o que foi imprescindível para meu amadurecimento pessoal e profissional.

Aos filhos que tive e tenho, Pixote, Pongo, Kiara, Dukie, Lucky, Thor, Safira, Logan, Akira, Maya, Pietra, Scooby, Lana e Nala, por demonstrar o amor da forma mais linda, encantadora e feliz que eu já conheci! Em especial, quero agradecer ao Trovão, meu primeiro

cavalo, por me mostrar esse caminho da Medicina Veterinária e por ter sido meu companheiro fiel durante o tempo que ficamos juntos. Você não desistiu de mim, assim como eu não desisti de você! Pudemos aproveitar um curto período de tempo, mas que mudou totalmente a minha vida.

Todos vocês, cada um do seu jeitinho, me ensinaram o valor da Família.

Agradeço também as pessoas que estiveram comigo antes e durante o período do mestrado, como meus professores do ensino médio (especialmente ao Gladston, ao Carlos Mariano e ao Hugo), todos os meus professores da faculdade (particularmente, o Dantas, o JD, a Bruna e o Ciro), todos os meus companheiros da turma VET 2013, todos os meus amigos dos estágios (em especial, Pedro, Micheline, Samuel, Faider, Paula, Edgar, Thiago, Breno, Denise, Daniel, Camilo, Bruna, Celina, Vivian, Marcelino, Seu Neco e Lorival), meus amigos da minha cidade natal e todos os amigos da minha família.

Jura, quero que saiba o quanto sou muito grata pela sua amizade, sua implicância e sua paciência para me ensinar 1000 vezes se preciso for. Você é parte essencial desse mestrado, desde a inspiração para fazer esse trabalho até hoje. Obrigada mesmo!

Agradeço muito aos pais do Domingos Lollobrigida por me receberem na sua casa durante o período do experimento; agradeço o carinho e a atenção que tiveram comigo. Domdom, você recebe uma dose extra de energia de agradecimento por me acompanhar e ser parte fundamental desse trabalho, apesar de rabiscar minhas fichas com sua letra “maravilhosa”. Por fim, agradeço muito a todos os proprietários e aos funcionários das fazendas de Cruzília que estiveram de portas abertas durante a coleta de dados, permitindo que esse trabalho fosse realizado.

Eu desejo que todos (mencionados ou não) recebam minha gratidão e saibam que qualquer palavra ou atitude (por menor que você acha que foi) me tocou e mudou minha visão sobre essa travessia. Sem qualquer um de vocês, eu não seria essa pessoa e não estaria vivendo esse momento com o coração transbordando tanto.

Agradeço ao programa de pós-graduação do Departamento de Veterinária, aos membros da banca de avaliação pelo tempo e conhecimento disponibilizado e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

A você, Universidade Federal de Viçosa, toda gratidão que há em meu coração por transformar quem sou!

*“Recria tua vida, sempre, sempre.
Remove pedras e planta roseiras e faz doces.
Recomeça.”
(Cora Coralina)*

RESUMO

SILVA, Danielle Estanislau Coelho, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2020. **Modelos não-lineares para descrever as curvas de crescimento da biometria testicular e das características morfométricas de garanhões Mangalarga Marchador.** Orientador: José Domingos Guimarães. Coorientador: Jurandy Mauro Penitente-Filho.

O presente estudo teve como objetivo descrever a curva de crescimento testicular e da morfometria corporal em garanhões da raça Mangalarga Marchador, ajustando modelos não lineares às mensurações de largura escrotal total (TSW), volume testicular (TV), peso corporal e altura de cernelha (WH). Um estudo transversal foi realizado com 120 garanhões, com idade entre 638 a 8006 dias. Os parâmetros dos modelos não-lineares (Brody, Gompertz, Hill, Logístico I e II, Meloun I e II, Michaelis-Menten, Mitscherlich e von-Bertalanffy) foram estimados pelo processo iterativo de Gauss-Newton no programa SAS (2002). A qualidade do ajuste foi avaliada pelos critérios de informação de Akaike corrigido (AICc) e Bayesiano (BIC), R^2 ajustado, soma de quadrados dos erros (ESS), desvio absoluto médio (MAD) e erro médio de previsão (APE). Com base na qualidade dos critérios de ajuste, o modelo Logístico I se encaixou melhor para a curva de crescimento de TSW, peso corporal e WH; enquanto o Logístico II mostrou-se o melhor modelo para a curva de crescimento de TV. Apesar da correlação alta e positiva entre TSW e TV ($r = 0,85$), a avaliação do desenvolvimento testicular por apenas a TSW não descreve totalmente as etapas de desenvolvimento dos testículos, uma vez que não considera o crescimento de outras medidas biométricas, especialmente a altura testicular que mantém o crescimento por um período mais longo. Portanto, para a determinação mais precisa da fase de desenvolvimento testicular em que o garanhão se encontra por meio de avaliação biométrica, a melhor opção é a avaliação de todas as mensurações testiculares. Além disso, a correlação moderada e positiva entre WH com TSW e TV ($r = 0,51$ para ambos) indica que as características biométricas testiculares e morfométricas estão associadas e, portanto, a biometria testicular pode ser incluída nos programas de seleção genética de garanhões da raça Mangalarga Marchador.

Palavras-chave: Garanhões. Mangalarga Marchador. Biometria testicular. Morfometria corporal. Modelos não-lineares. Curvas de crescimento.

ABSTRACT

SILVA, Danielle Estanislau Coelho, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2020. **Nonlinear models to describe the growth curves of testicular and morphometric traits of Mangalarga Marchador stallions.** Adviser: José Domingos Guimarães. Co-Adviser: Jurandy Mauro Penitente-Filho.

This study aimed to describe the testicular growth curve of testicular biometrics and body morphometry in Mangalarga Marchador stallions. Nonlinear models were fitted to total scrotal width (TSW), testicular volume (TV), body weight (BW) and withers height (WH). A cross-sectional study was conducted with 120 stallions, aging from 638 to 8006 days. The parameters of nonlinear models (Brody, Gompertz, Hill, Logistic I and II, Meloun I and II, Michaelis-Menten, Mitscherlich and von-Bertalanffy) were estimated by the Gauss-Newton iterative process. The goodness of fit was evaluated by the corrected Akaike's (AICc) and Bayesian (BIC) information criteria, Adjusted R^2 , error sum of square (ESS), mean absolute deviation (MAD) and average prediction error (APE). Based on the goodness of fit, the Logistic I model fitted better to the growth curve of TSW, BW and WH; while Logistic II fitted better for the TV growth curve. Despite the high and positive correlation between TSW and TV ($r = 0.85$), the evaluation of testicular development by only TSW does not fully describe the stages of development of the testes, since TSW does not consider the growth of other biometric measures, especially the testicular height that maintains growth for a longer period. Therefore, to determine the testicular development phase, in which the stallion is found, by biometric evaluation, the best option is to evaluate all testicular measurements and thus obtain the TV as well. In addition, the moderate and positive correlations between WH with TSW and TV ($r = 0.51$ for both) indicate that biometric and morphometric characteristics are associated, so testicular biometry can be included in the genetic selection programs of Mangalarga Marchador stallions.

Keywords: Mangalarga Marchador. Horses. Testicular biometrics. Body morphometry. Nonlinear models. Growth curves.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Fig. 1: Observed Total Scrotal Width (TSW) of Mangalarga Marchador stallions from 638 to 8006 days of age.....	56
Fig. 2: Total Scrotal Width (TSW) estimated by Logistic I model in Mangalarga Marchador stallions.....	59
Fig. 3: Absolute Growth Rate (AGR) estimated by Logistic I model in Mangalarga Marchador stallions.....	59
Fig. 4: Observed Testicular Volume (TV) of Mangalarga Marchador stallions from 638 to 8006 days of age.....	60
Fig. 5: Testicular Volume (TV) estimated by Logistic II model in Mangalarga Marchador stallions..	63
Fig. 6: Absolute Growth Rate (AGR) estimated by Logistic II model in Mangalarga Marchador stallions.....	63
Fig. 7: Absolute Growth Rate (AGR) estimated by Logistic I (TSW) and Logistic II (TV) model in Mangalarga Marchador stallions.....	64
Fig. 8: Testicular width (TW), length (TL) and height (TH) estimated by Logistic II model in Mangalarga Marchador stallions.....	66
Fig. 9: Absolute Growth Rate (AGR) estimated by Logistic II model for TW, TL and TH in Mangalarga Marchador stallions.....	66
Fig. 10: Observed body weight of Mangalarga Marchador stallions from 638 to 8006 days of age. ...	67
Fig. 11: Body Weight growth curve estimated by Logistic I model in Mangalarga Marchador stallions.....	71
Fig. 12: Absolute Growth Rate (AGR) estimated by Logistic I model in Mangalarga Marchador stallions.....	71
Fig. 13: Observed Wither Height of Mangalarga Marchador stallions from 638 to 8006 days of age.	72
Fig. 14: Wither Height growth curve estimated by Logistic I model in Mangalarga Marchador stallions.....	75
Fig. 15: Absolute Growth Rate (AGR) estimated by Logistic I model in Mangalarga Marchador stallions.....	75

LISTA DE TABELAS

Table 1 - Number of Mangalarga Marchador stallions by age-group.	46
Table 2 – Nonlinear models used to describe the growth of TSW, TV, BW and WH in stallions of the Mangalarga Marchador breed.	48
Table 3 – Inflection points (IP) and age at IP of the nonlinear models used to describe TSW, TV, BW and WH growth curves in Mangalarga Marchador stallions.	49
Table 4 - Descriptive statistics of testicular biometry and body morphometry of Mangalarga Marchador stallions	53
Table 5 - Mean \pm SE values of the testicular biometry and body morphometry of Mangalarga Marchador stallions	54
Table 6 - Mean \pm SE values of the testicular biometry evaluated of Mangalarga Marchador stallions	54
Table 7 - Pearson Correlation Coefficients on the mean of testicular biometry and body morphometric characteristics evaluated of Mangalarga Marchador stallions.....	55
Table 8 - Parameter estimates (\pm SE) for nonlinear models used to describe Total Scrotal Width (TSW) of Mangalarga Marchador stallions.....	57
Table 9 - Inflection points (IP) and age at IP estimated by the Gompertz, Hill, Logistic I and II, and von Bertalanffy models used to describe the growth curve of Total Scrotal Width (TSW) of Mangalarga Marchador stallions.	57
Table 10 - Goodness of fit for nonlinear models used to describe Total Scrotal Width (TSW) of Mangalarga Marchador stallions.....	58
Table 11 - Parameter estimates for nonlinear models used to describe Total Volume (TV) of Mangalarga Marchador stallions.	61
Table 12 - Inflection points (IP) and age at IP estimated by the Gompertz, Hill, Logistic I and II, and von Bertalanffy models used to describe the growth curve of Testicular Volume (TV) of Mangalarga Marchador stallions.	61
Table 13 - Goodness of fit for nonlinear models used to describe Testicular Volume (TV) of Mangalarga Marchador stallions.	62
Table 14 – Parameter estimates for Logistic II model used to describe testicular width (TW), testicular length (TL) and testicular height (TH) of Mangalarga Marchador stallions.	65
Table 15 - Inflection points (IP) and age at IP estimated by the Logistic II model used to describe the growth curve of testicular width (TW), testicular length (TL) and testicular height (TH) of Mangalarga Marchador stallions.	65
Table 16 - Parameter estimates for nonlinear models used to describe Weight of Mangalarga Marchador stallions.	68

Table 17 - Inflection points (IP) and age at IP estimated by the Gompertz, Hill, Logistic I and II, and von Bertalanffy models used to describe the growth curve of Weight of Mangalarga Marchador stallions.	68
Table 18 - Goodness of fit for nonlinear models used to describe body Weight growth curve of Mangalarga Marchador stallions.	70
Table 19 - Parameter estimates for nonlinear models used to describe Wither Height of Mangalarga Marchador stallions.	73
Table 20 - Inflection points (IP) and age at IP estimated by the Gompertz, Hill, Logistic I and II, and von Bertalanffy models used to describe the growth curve of Wither Height of Mangalarga Marchador stallions.	73
Table 21 - Goodness of fit for nonlinear models used to describe Wither Height of Mangalarga Marchador stallions.	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCCMM – Associação Brasileira de Criadores de Cavalos Mangalarga Marchador

Adj R^2 – Coeficiente de Determinação Ajustado

AGR – Absolute Growth Rate

AICc – Critério de Informação De Akaike Corrigido (Akaike's Criteria of Information Corrected)

APE – Erro Percentual Absoluto Médio (Average Prediction Error)

BIC – Critério de Informação Bayesiano (Bayesian's Criteria of Information)

BSE - Avaliação da Solidez Reprodutiva (Breeding Soundness Evaluation)

BW – Body Weight

CEUA – Comissão de Ética no Uso de Animais (Ethics Committee for The Use of Animals)

Cm - Centímetros

DSO – Daily Sperm Output

ESS – Soma do Quadrado dos Erros (Error Sum of Square)

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IP – Inflection Point

Kg - Kilogramas

LET – Largura Escrotal Total

LTH – Left Testicular Height

LTL – Left Testicular Length

LTV – Left Testicular Volume

LTW – Left Testicular Width

MAD – Erro Absoluto Médio (Mean Absolute Deviation)

MM – Mangalarga Marchador

PE – Perímetro Escrotal

PI – Ponto de Inflexão

RTH – Right Testicular Height

RTL – Right Testicular Length

RTV – Right Testicular Volume

RTW – Right Testicular Width

SC – Scrotal Circumference

TH – Testicular Height

TL – Testicular Length

TSW – Total Scrotal Width

TV – Testicular Volume

TW – Testicular Width

VT – Volume Testicular

WH – Withers Height

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Raça Mangalarga Marchador	18
2.2 Características Morfométricas.....	19
2.3 Características Biométricas	22
2.4 Puberdade e Maturidade Sexual	24
2.5 Curva de Crescimento	27
2.6 Modelos não-lineares	29
2.7 Qualidade de Ajuste	31
REFERÊNCIAS	32
ABSTRACT	43
1 INTRODUCTION	44
2.1 Ethics and Animals	46
2.2 Data Collection	46
2.2.1 Testicular Biometry.....	46
2.2.2 Body Morphometric	47
2.3 Statistical Analysis	48
2.3.1 Nonlinear Models.....	48
2.3.2 Goodness of Fit	50
2.3.3 Absolute Growth Rate (AGR).....	51
2.3.4 Phenotypic Correlations	51
3 RESULTS	53
4 DISCUSSION	76
5 CONCLUSION	81
REFERENCES	82

1 INTRODUÇÃO

Com o objetivo de identificar características que estreitam os vínculos entre a reprodução e a produção animal por meio da correlação fenotípica e genética, considerando a facilidade para mensurá-las (BERGMANN et al., 1998), desenvolveu-se a metodologia de avaliar touros por meio do perímetro escrotal (PE). Esta é uma característica de média/alta herdabilidade (BRINKS, 1994; KNIGHTS et al., 1984; LOAIZA-ECHEVERRI et al., 2013; LUNSTRA, 1982), apresenta correlação com outras características reprodutivas e produtivas, tanto de machos quanto de fêmeas (COULTER & FOOTE, 1979; TOELLE & ROBISON, 1985; NOTTER et al., 1993); e ainda é eficiente para predizer o potencial reprodutivo do macho em qualquer espécie, mesmo que a avaliação quantitativa e qualitativa do sêmen seja o método principal (UNANIAN et al., 2000). Portanto, a avaliação biométrica dos testículos, juntamente com a avaliação seminal, é imprescindível para predizer a fertilidade dos machos.

Considerando a disposição anatômica dos testículos dos garanhões, a característica que possui similaridade ao PE dos bovinos é a largura escrotal total (LET). Há relatos na literatura que reforçam a utilização desta medida como ferramenta para predizer o potencial reprodutivo em equinos. Thompson et al. (1979) relataram a alta correlação entre a largura escrotal total e a produção espermática diária ($r = 0,75$). Adicionalmente, Blanchard et al. (2001) obtiveram correlação moderada tanto entre a LET e o número total de espermatozoides ($r = 0,37$), quanto entre a LET e o número de espermatozoides com motilidade progressiva ($r = 0,36$). Por sua vez, Stout & Colenbrander, em *Equine Reproduction* (2011), ratificam a avaliação da biometria testicular como indicador útil da capacidade de produção espermática, ao afirmarem que a produção diária de espermatozoides em garanhão está subordinada à uma combinação entre a quantidade de tecido testicular funcional e a eficiência da espermatogênese.

Bailey et al. (1996) verificaram que não há representatividade da produção espermática quando se considera apenas a mensuração do perímetro escrotal; no caso dos equinos, a largura escrotal total. Assim, com o objetivo de aumentar a precisão no processo de seleção de reprodutores por meio da avaliação biométrica dos testículos, principalmente no que diz respeito à maturidade sexual dos animais, outra característica é avaliada: o volume testicular - VT (BAILEY et al., 1996; PENITENTE-FILHO et al., 2018, 2019; UNANIAN et al., 2000). Pesquisas direcionadas aos equinos demonstraram que a partir do volume testicular é possível inferir a quantidade de parênquima testicular e, conseqüentemente, a produção de espermatozoides, pois há relatos na literatura (LOVE et al., 1990; ROBALO SILVA, 2007;

FREITAS, 2010; ANGUS et al., 2011) sobre a alta correlação entre o volume testicular e a produção de espermatozoide. Segundo Robalo Silva (2007), o coeficiente de correlação entre volume testicular e produção espermática é $r = 0,654$.

Considerando que a reprodução está interligada com os demais processos biológicos do organismo, é possível avaliá-la em conjunto com o desenvolvimento corporal do macho. Essa correlação tem suma importância atualmente, porque a funcionalidade dos equinos tem maior destaque na área esportiva, apesar de ainda ser relevante para a agropecuária. Portanto, o interesse sobre estes animais baseia-se ainda mais na sua capacidade motora, ou a dinâmica dos movimentos corporais, que expressam a versatilidade do animal em realizar determinadas tarefas, diferentemente do que acontece com outras espécies de relevância zootécnica. Dessa forma, para o desenvolvimento dos programas de melhoramento genético em equinos, a compreensão sobre a conformação corporal é imprescindível.

Dentro desse contexto, dispõe-se da finalidade das curvas de crescimento, que consistem em correlacionar medidas de tamanho (peso, altura, largura, volume) com a idade, proporcionando uma descrição visual do crescimento, sendo que a interpretação fornece uma explicação do que está ocorrendo biologicamente (KSHIRSAGAR & SMITH, 1995). Para a confecção das curvas de crescimento, os modelos não-lineares têm-se mostrado mais adequados quando comparados aos modelos lineares, pois, além de serem capazes de englobar grande número de medidas, apresentam resultados com interpretação biológica (LOAIZA-ECHEVERRI et al., 2013).

Os modelos não-lineares que são usados para descrever as curvas de crescimento, possuem parâmetros com interpretações biológicas relevantes, são eles: β_1 (assíntota) que é a variável estimada na maturidade; β_2 que é uma constante de integração importante para modelar a curva sigmoide, mas sem interpretação biológica, exceto para o modelo de Michaelis-Menten, em que β_2 é a idade que o valor da variável é exatamente a metade da assíntota (β_1); β_3 ou o índice de maturidade, estabelecendo a velocidade com que a variável se aproxima da assíntota; e β_4 , o ponto de inflexão em modelos de ponto de inflexão variável. O ponto de inflexão é interpretado como o momento em que a aceleração do crescimento termina e a fase de auto inibição começa, até atingir o valor da variável na maturidade (NOTTER et al., 1985; NIETO et al., 2006; LOAIZA-ECHEVERRI et al., 2013).

A raça Mangalarga Marchador (MM) possui a maior associação de criadores da América Latina e, considerando a quantidade de animais e de membros, ela é considerada a maior raça

equina nacional. Além da beleza, possui outras características como a docilidade, a rusticidade, a comodidade no andamento e a aptidão para o lazer, para os esportes e também para o trabalho agropecuário. Devido a união de versatilidade, beleza e comodidade, os cavalos MM são amplamente utilizados, tornando-se, no Brasil, uma atividade importante e lucrativa, pois essas características peculiares do MM levam os animais a atingirem alto valor no mercado (COSTA et al., 2004; SANTIAGO et al., 2016).

Considerando esse contexto, este estudo foi realizado com o objetivo de avaliar as correlações fenotípicas entre as mensurações biométricas e morfométricas, além das mesmas mensurações com a idade e peso corporal; determinar, conforme os resultados dos parâmetros ($\hat{\beta}_1$, $\hat{\beta}_2$ e $\hat{\beta}_3$) e a qualidade de ajuste, qual dos vários modelos não-lineares mais se adequa às medidas biométricas dos testículos de garanhões da raça Mangalarga Marchador e também às medidas morfométricas; estabelecer a curva de crescimento para largura escrotal total (LET) e volume testicular (VT) destes animais, bem como peso corporal e altura de cernelha; e por fim indicar a relação destas mensurações com as fases de desenvolvimento sexual, a puberdade e a maturidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Raça Mangalarga Marchador

Em 2010, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) publicou dados sobre o panorama da equinocultura no Brasil. Segundo sua análise, há cerca de 5,6 milhões de equinos distribuídos em todo o território nacional, o que leva o Brasil a ocupar o terceiro lugar no ranking mundial em número absoluto da espécie (FAO, 2010). O comércio destes exerce forte influência na economia nacional, com movimentação econômica em torno de R\$ 7,3 bilhões por ano, além de gerar cerca de três milhões de empregos diretos e indiretos (ESALQ, 2006).

Embora todos os equinos façam parte de uma única espécie, *Equus caballus*, existem várias raças diferentes no mundo. Isso se deve aos efeitos de diferentes ambientes onde os animais são criados, além da interferência do homem selecionando determinadas características que mais lhe satisfazem, por exemplo, força, velocidade, andamento, harmonia morfológica, dentre outras, modulando a especificidade fenotípica e funcional nas diferentes raças equinas.

Historicamente, há registros demonstrando que a origem do cavalo Mangalarga Marchador se deu em Minas Gerais. Seus precursores, cavalos Alter da raça espanhola Andaluz, foram introduzidos no país pelos portugueses nos primeiros anos do século XIX. Os garanhões fornecidos aos integrantes da corte real e da nobreza, ao serem cruzados com éguas nativas, geraram novos animais que foram criados e adaptados às condições brasileiras. Estes, por sua vez, foram selecionados principalmente pelo andamento cômodo, uma vez que era necessário animais apropriados para longos períodos de montaria. Outras características também foram relevantes, como a resistência, o porte elegante, a beleza e o temperamento dócil. O cavalo da raça Mangalarga Marchador tem aproximadamente 200 anos de seleção, e só em 2014, pela lei nº 12.975/2014, ele foi declarado como a raça nacional de cavalos do Brasil (PLANALTO DF, 2014).

Esta raça possui a maior associação de criadores da América Latina (Associação de Criadores do Cavalo Mangalarga Marchador – ABCCMM), sendo classificada como a terceira maior raça do mundo: há 10.400 associados distribuídos por todas as regiões do Brasil e mais de 400.000 indivíduos registrados. A ABCCMM, com sede em Belo Horizonte, Minas Gerais, foi criada em 1949. Além da importância nacional, o cavalo da raça Mangalarga Marchador apresenta relevância internacional, evidenciado pelo fato de existir núcleos oficiais da ABCCMM nos Estados Unidos, Alemanha, Itália e Argentina.

Ribeiro et al. (2018) ressaltam a importância do conhecimento sobre o padrão de desenvolvimento de cada raça especificamente, pois esse fato permite a estimativa de parâmetros que possibilitam selecionar, com mais assertividade, os melhores animais, otimizando o manejo de criatórios. Alguns trabalhos, como os de Freitas (2010), Oliveira (2014) e Rua (2014), foram conduzidos para obter a descrição biométrica de garanhões MM, sendo avaliados dentro e fora da estação reprodutiva e em dois estados diferentes (Minas Gerais e Rio de Janeiro). Enquanto outros pesquisadores desenvolveram estudos para as outras raças equinas nacionais. Mendes (2012), por exemplo, avaliou o desenvolvimento testicular de garanhões da raça Crioulo por meio da avaliação física e histológica; Manso Filho et al. (2000) e Borges et al. (2010), por sua vez, avaliaram a biometria testicular dos cavalos da raça Campolina, correlacionando-a com a idade e peso corporal.

2.2 Características Morfométricas

Os equinos se tornaram relevantes para o desenvolvimento da sociedade humana desde a sua domesticação, uma vez que o objetivo era utilizá-los primeiramente em batalhas e expedições, depois na agricultura (HONTANG, 1989). Independentemente de onde eram utilizados, os cavalos são coadjuvantes na trajetória do desenvolvimento humano.

Dentro desse contexto, a estrutura corporal dos cavalos tornou-se essencial, pois demonstrava sua capacidade física. Portanto, a mensuração das dimensões e proporções corporais foram as principais características consideradas para a seleção dos cavalos (STOUT & COLENBRANDER, 2011; SOUZA, 2017), pois estas, por exemplo, comprimento, altura e largura corporal, além das medidas angulares, influenciam a estrutura física do animal e atuam sobre a qualidade do seu movimento (PINTO et al., 2005).

Além disso, outro fator que corrobora com o enorme interesse sobre a conformação corporal como indicadora de desempenho e qualidade física dos equinos submetidos à avaliação é a facilidade em mensurá-las. Sendo assim, a escolha dos garanhões reprodutores se dava por meio da sua conformação corporal, isto é, da funcionalidade conferida à simetria e à silhueta da estrutura física destes (SANTOS, 2017).

Atualmente, apesar da funcionalidade dos equinos ainda ser relevante para a agropecuária, tem maior destaque na área esportiva. Portanto, o interesse sobre estes baseia-se ainda mais na sua capacidade motora, ou a dinâmica dos movimentos corporais, que expressam a versatilidade do animal em realizar determinadas tarefas, diferentemente do que acontece com outras espécies de relevância zootécnica. Dessa forma, para o desenvolvimento dos programas

de melhoramento genético em equinos, a compreensão sobre a conformação corporal é imprescindível.

Cada raça equina apresenta um biótipo adequado à sua função atlética. Sendo assim, dentro dos programas de melhoramento genético em equinos, o padrão morfológico entre as diferentes raças e suas particularidades é um dos, se não o principal, elemento a ser considerado, pois é utilizada para distinguir a aplicabilidade do cavalo de acordo com sua conformação corporal (SANTOS, 2017).

As dimensões e proporções corporais são fundamentais na execução dos movimentos, uma vez que um animal de conformação corporal harmoniosa tende a ter uma capacidade motora equilibrada, sem sobrecarregar diferentes regiões anatômicas devido à compensação de esforço, conferindo-lhe vantagem para suportar melhor os estresses físicos que é submetido durante o exercício ou a lida (SCHADE et al., 2015).

O cavalo Mangalarga Marchador (MM) foi originalmente direcionado para o serviço no campo e cavalgadas. Posteriormente, com o uso na lida reduzido devido à mecanização das fazendas, a utilização desse cavalo em passeios e cavalgadas de lazer ganhou maior número de adeptos. Sobre essa evolução funcional do cavalo MM, Andrade (2008) afirma “lazer é sinônimo de conforto.” Portanto, a busca pela comodidade da marcha foi intensificada, o que levou ao desenvolvimento de mais estudos relacionados à conformação corporal, que não é a condição para o animal marchar, porém contribui amplamente na qualidade desta.

Para eliminar a subjetividade na análise física equina, uma variedade de instrumentos manuais e de fácil manuseio, como hipômetro, fita métrica e artrogoniômetro, foram indicados como essencial para as mensurações corporais dos cavalos (MARCENAC, AUBLET, D'AUTHEVILLE, 1990), uma vez que essas ferramentas fornecem medidas quantitativas relativamente confiáveis e próximas das dimensões reais (MAGNUSSON, THAFVELIN, 1990).

Adicionalmente, os pontos de referência para analisar as particularidades da conformação corporal dos equinos foram definidos por Magnusson e Thafvelin (1990), evitando a discrepância entre avaliações das características métricas e angulares. O critério utilizado para a escolha destes pontos consiste na facilidade de localização, por meio da palpação de extremidades ósseas, facilitando a determinação das distâncias entre os ossos, bem como das medidas angulares de articulações.

Neste contexto, o estudo desenvolvido por Santos (2017) demonstrou que os métodos manuais de mensurações morfométricas apresentam correlação alta e positiva com os métodos computacionais para altura de cernelha (0,95), evidenciando a objetividade da análise. Dessa forma, é possível utilizá-la. Além disso, a altura na cernelha, entre todas as medidas lineares, é uma das mais seguras conforme o relato de Cabral et al. (2004), porque tem menores variações decorrentes do instrumento de mensuração ou dos erros cometidos pelo mensurador.

Um dos primeiros levantamentos do registro de altura de cernelha da raça Mangalarga Marchador foi feito por Carneiro et al. (1952), em que os valores médios para os machos foram de 151 cm e para as fêmeas 144 cm. Atualmente, para efeito de registro definitivo dos equinos na Associação Brasileira de Criadores do Cavallo Mangalarga Marchador (Estatuto da ABCCMM, 2010), os valores aceitos são de 147 a 157 cm para os machos, e para as fêmeas de 140 a 154 cm. Santiago et al. (2016) demonstraram que a altura de cernelha média aumentou 1,0 cm entre as décadas de 70 e 80, mantendo-se estável, em 150,2 cm desde então.

A altura de cernelha dos potros ao nascimento representa cerca de 60% da altura de cernelha no animal adulto (JORDÃO & CAMARGO, 1950; SANTOS, 1989). Além disso, estes autores demonstram que o crescimento é muito intenso até um ano de idade, principalmente no primeiro mês pós-nascimento.

O perímetro torácico, por sua vez, é uma das medidas geralmente utilizadas na descrição de cavalos de sela e de tração (SANTOS, 1989), pois está vinculado à capacidade cardiorrespiratória do animal (BERBARI NETO, 2005). Portanto, os cavalos da raça Mangalarga Marchador, que tem sido cada vez mais utilizados em diversas atividades funcionais, como passeios de longa distância, provas de resistência, provas funcionais, competições de marcha, dentre outras, são considerados animais atletas em potencial, o que reforça a necessidade de apresentarem desenvolvimento torácico compatível com esta capacidade (REZENDE et al., 2000).

Borton (1979) embasa essa teoria ao afirmar que para os cavalos alcançarem um desempenho satisfatório, eles devem ter uma caixa torácica profunda com costelas largas e bem arqueadas, pois essa região, além de fornecer a base para a inserção dos músculos dos membros anteriores, abriga e protege órgãos vitais: coração e pulmões, ambos imprescindíveis para a capacidade atlética do animal.

Santiago et al. (2016) realizaram uma pesquisa, utilizando as informações arquivadas na Associação Brasileira dos Criadores do Cavallo Mangalarga Marchador (ABCCMM) de

23148 machos e 92980 fêmeas, para avaliar a evolução das medidas morfométricas do cavalo MM ao longo de sua formação. Dentre várias outras medidas, o perímetro torácico e a altura de cernelha foram avaliados. Com relação ao perímetro torácico dos garanhões MM, observou a diminuição desta medida ao longo do tempo (de 174,5 cm, na década de 1970, para 172,2 cm, em 2010).

Segundo Lucena (2011), é confiável obter o peso vivo de equinos por meio da mensuração do perímetro torácico, desde que não use éguas gestantes, pois o perímetro torácico é altamente inconstante nessa fase do animal.

Souza (2017) demonstra o padrão de crescimento dos garanhões MM, por meio da curva de crescimento, ao analisar animais com idade entre 06 e 153 meses. No período entre 6 e 24 meses, o crescimento é mais homogêneo. Esse crescimento, no primeiro ano de vida, é caracterizado pela aquisição de 62 - 65% do peso vivo dos animais adultos (REZENDE et al., 1984; NRC, 2007; GARCIA et al., 2011). Por fim, a partir dos 60 meses de idade, é possível observar o platô da curva de crescimento, no qual Souza (2017) baseia a afirmação que os animais MM crescem em peso corporal até próximo a esta idade.

Em decorrência da breve apresentação, está evidente como a avaliação da morfometria corporal é uma ferramenta eficiente para estimar o potencial atlético do garanhão, o que possui suma importância dentro do mercado de equinos.

2.3 Características Biométricas

Dentre os parâmetros testiculares, o mais utilizado em bovinos para avaliação do seu potencial reprodutivo é o perímetro escrotal (PE), pois além de possuir herdabilidade média/alta (KNIGHTS et al., 1984; BRINKS, 1994; SILVEIRA et al., 2012; LOAIZA-ECHEVERRI et al., 2013), possui correlações favoráveis com características produtivas e reprodutivas, tanto dos machos quanto das fêmeas (COULTER & FOOTE, 1979; TOELLE & ROBISON, 1985; NOTTER et al., 1993). Além disso, PE tem sido sugerido como indicador de qualidade seminal (LUNSTRA et al., 1978; SALVADOR, 2001; BILGIN et al., 2004).

Além disso, o perímetro escrotal é simples de mensurar, portanto, é amplamente empregado no exame andrológico de touros que estão em programas de seleção genética. Normalmente é usado para prever a fertilidade desses animais, uma vez que está diretamente relacionado com a quantidade e a qualidade espermática (LUNSTRA et al., 1978; SALVADOR, 2001; BILGIN et al., 2004), obtendo, dessa forma, animais sexualmente mais

precoces e mais férteis (BERGMANN. et al., 1998; OKANO et al., 2018; PENITENTE-FILHO et al., 2018, 2019).

Entretanto, o PE não representa exatamente a massa testicular, pois não leva em consideração a variação da espessura da pele escrotal e a forma testicular ovalada. Considerando que a produção de espermatozoides pode depender de outros fatores que não o PE, o volume testicular (VT) deve ser examinado na seleção de touros (BAILEY et al., 1996), sendo obtido por meio de um cálculo que abrange outras medidas biométricas, que são o comprimento, a largura e a altura testicular.

O desempenho reprodutivo, em termos de valor econômico, é também importante para o sistema de criação dos equinos. Portanto, a avaliação reprodutiva por meio da biometria testicular é útil. Empregando essa análise nos equinos, é importante considerar as particularidades anátomo-fisiológicas da espécie: os testículos são horizontalmente posicionados no escroto, o que desfavorece o uso do perímetro escrotal como principal medida biométrica. Diante disso, a principal medida a ser utilizada é a largura escrotal total – TSW (VARNER et al., 1991).

A utilização da medida da largura escrotal total (LET) é uma aplicação útil para prever a produção espermática diária de um garanhão, uma vez que há um coeficiente de correlação entre a largura escrotal total e produção espermática diária de $r = 0,75$ (THOMPSON et al., 1979).

Durante o exame andrológico, outras medidas biométricas são coletadas, como o comprimento (C), a largura (L) e altura (H). A partir destas, é possível estimar o valor do volume dos testículos direito (RTV) e esquerdo (LTV) separadamente, por meio da equação proposta por Love et al. (1990), o qual baseou o seu cálculo na forma elipsoide dos testículos dos equinos. A partir do valor do volume de cada testículo, obtém-se o volume testicular total (TV), que, por sua vez, é utilizado para determinar um índice, denominado produção diária de espermatozoides (*Daily Sperm Output* - DSO). Este índice foi elaborado por Love et al. (1990), cujo cálculo é:

$$\text{Produção DSO } (\times 10^9) = (\text{VT} \times 0,024) - 0,76$$

A relevância principal dessa característica está na capacidade em prever a eficiência da espermatogênese do animal. Sendo assim, é um importante indicador para a fertilidade,

assim como para sugerir se há algum tipo de disfunção que leve a produção de baixo número de espermatozoides viáveis (BRINSKO et al., 2011).

Assim como em bovinos, a avaliação da biometria testicular é uma ferramenta eficiente para estimativa do potencial reprodutivo do garanhão (THOMPSON et al., 1979; PICKETT et al., 1993; BORGES et al., 2010; STOUT & COLENBRANDER, 2011; MENDES, 2012; OLIVEIRA, 2014; RUA, 2014). Portanto, a coleta dos dados biométricos durante o exame andrológico permite diagnosticar alterações testiculares, enquanto as suas interpretações auxiliam na predição do potencial reprodutivo.

Contudo, é possível observar que a quantidade de estudos direcionados para o desenvolvimento biométrico dos equinos é menor quando comparado a outras espécies de animais de produção, como os bovinos. Dentre os vários fatores motivacionais para essa diferença, destaca-se a dificuldade de obtenção dos dados, uma vez que o crescimento dessa espécie é mais tardio em relação à outras, o que demandaria mais tempo (RIBEIRO et al., 2018). Além disso, pode-se considerar o retorno econômico sobre os programas de seleção genética de cada um. Esse fator norteia o investimento na área, assim como as principais características a serem selecionadas, o que impacta diretamente na quantidade de pesquisas para a descrição da biometria testicular e, conseqüentemente, da curva de crescimento testicular em equinos.

2.4 Puberdade e Maturidade Sexual

Por muito tempo, a seleção de cavalos baseava-se principalmente no pedigree, na aparência, na marcha e no desempenho atlético dos animais, sendo a fertilidade desconsiderada como um critério de seleção principal (STOUT & COLENBRANDER, 2011). Porém, segundo os mesmos autores, tornou-se comum a exigência da certificação do "potencial reprodutivo adequado", com base em dados reais de fertilidade ou em uma avaliação do potencial reprodutivo (BSE) para o registro dos cavalos nos livros contendo os pedigrees da maioria das raças esportivas europeias, os chamados *studbooks*.

A maioria dos garanhões submetidos ao registro no *studbook* ainda não reproduziram, isto é, ainda não tiveram sua fertilidade atestada por meio da produção de potros, pois são animais muito jovens. Sendo assim, ao invés de utilizar esses dados de fertilidade, aceita-se o exame andrológico dos animais como indicação válida para o potencial reprodutivo do garanhão (KENNEY et al., 1983), de modo que os aspectos da fertilidade, como a libido, o acasalamento, o tamanho dos testículos, a produção de espermatozoides e a qualidade seminal são avaliados (COLENBRANDER et al., 1992)

A puberdade é uma fase difícil de ser definida para a maioria das espécies, incluindo o garanhão (HENINGER, 2011). Segundo este autor, a puberdade geralmente é caracterizada por um grau primário de maturidade dos órgãos genitais, além do desenvolvimento das características sexuais secundárias e dos aspectos psicossociais do animal. Porém, Heninger (2011) demonstrou a disparidade entre os pesquisadores acadêmicos a respeito da conceituação de puberdade: alguns fundamentam a sua definição estritamente na idade que o animal tem o primeiro ejaculado contendo 50 milhões de espermatozoides com motilidade espermática progressiva $\geq 10\%$; enquanto outros pesquisadores baseiam-se no momento que o indivíduo atinge a capacidade de se reproduzir com sucesso.

Dentro deste contexto, Roser (2000) afirma que o período de puberdade dos garanhões está entre 12 – 18 meses, com base no perfil endócrino dos animais. Seguindo a metodologia do estudo anterior, Hess and Roser (2005) demonstraram que a puberdade em garanhões se estende para o período de 10 a 24 meses. Considerando a avaliação biométrica, Naden et al. (1990), estudando potros da raça Quarto de Milha, estimaram que a idade à puberdade é 1,7 anos (variando de 1,17 a 2,02 anos), enquanto a largura escrotal total dos potros é de aproximadamente 7,7cm.

Independentemente da variação conceitual, Heninger (2011) ressalta que a puberdade não é um evento único, mas uma coleção de eventos e interações dinâmicas ao longo do tempo, que conduzirão à capacidade de produzir descendentes.

Hafez & Hafez (2004) subdividem a puberdade em três estágios: o primeiro, chamado pré-puberdade, consiste no período de rápido desenvolvimento dos órgãos reprodutivos; a puberdade propriamente dita, onde os animais tornam-se aptos reprodutivamente; e, por fim, o período pós-puberdade, onde o desenvolvimento continua e os órgãos reprodutivos alcançam a maturidade sexual plena. Em equinos, o processo de desenvolvimento testicular no período pós-puberdade pode perdurar até o animal atingir 15 anos de idade, uma vez que há aumento significativo no peso testicular, na produção diária de espermatozoides e na reserva epididimária. Porém, a taxa de crescimento não é acentuada. Mckinnon et al. (2011), em *Equine Reproduction*, reforçam essa teoria e estende o período ao demonstrar a tendência do aumento da composição celular até os 20 anos de idade.

Heninger (2011), por sua vez, subdivide a puberdade em quatro etapas, pois considera o desenvolvimento embrionário dos órgãos sexuais masculinos como primeira fase, além de incluir alguns eventos perinatais importantes para o desenvolvimento anatômico e funcional adequado, como, por exemplo, a deiscência testicular. A segunda fase é denominada pelo autor como "fase quiescente" e compreende o crescimento e o desenvolvimento corporal do potro, sem envolver o amadurecimento sexual dele. No que lhe concerne, a terceira fase consiste em mudanças assertivas para o desenvolvimento sexual, levando a funcionalidade reprodutiva, principalmente pela produção de espermatozoides, pela regulação endócrina e o desenvolvimento da libido, sendo reconhecida como a puberdade propriamente dita. Por fim, o animal atinge a maturação sexual e a obtenção de eficiência reprodutiva durante a fase pós-puberal.

Pesquisas diretamente relacionadas à puberdade do garanhão geralmente estão vinculadas à espermatogênese e ao padrão hormonal (NADEN et al., 1990; ROSER, 2000; ROSER & HESS, 2005), não necessariamente à biometria testicular. Blanchard et al. (2001) ressaltaram que a determinação da espermatogênese dos garanhões na puberdade está mais vinculada ao tamanho dos testículos do que à idade do cavalo. Portanto, Heninger (2011) ressalta a importância de mais estudos com intuito de explorar mais profundamente o padrão de desenvolvimento testicular nos garanhões, a fim de melhorar a compreensão dos eventos envolvidos na puberdade.

Duas considerações relevantes são feitas por Heninger (2011) enquanto explicita o processo de desenvolvimento sexual do garanhão. Primeiro, se a definição de puberdade é a funcionalidade reprodutiva propriamente dita, então, todas as mudanças que conduzem à esta devem ser consideradas pré-púberes. Hafez & Hafez (2004) corroboram com essa teoria ao afirmarem que o período pré-púbere, muitas vezes, é equivocadamente referido como puberdade. Além do mais, Heninger (2011) ressalta que a puberdade não deve ser confundida com a maturidade sexual, especialmente para o garanhão. Nessa espécie, a maturidade sexual, considerando o perfil espermatogênico e endócrino, ocorre muito tempo após a puberdade, por volta de 4-5 anos de idade (JOHNSON & THOMPSON, 1983; NADEN, et al., 1990; ROSER, 2000; ROSER AND HESS, 2005; ANGUS et al., 2011).

No trabalho de Johnson & Thompson (1983) foi apresentado que o número de células de Sertoli, o peso e o tamanho testicular aumentam com a idade, estabilizando quando os garanhões atingem a maturidade sexual, depois dos 5 anos. Roser (2000) concorda com estes autores ao afirmar que crescimento e desenvolvimento testicular perdura ao longo dos anos e

cessa apenas quando o animal atinge 4 a 5 anos de idade. Mais tarde, o trabalho de Roser & Hess (2005) complementa a teoria, ao afirmar que a fase de maturação sexual se estende durante todo o período entre o 2º e o 5º ano. Por fim, Angus et al. (2011) demonstraram quantitativamente o aumento da composição celular dos testículos à medida que aumenta a idade dos garanhões: além do crescimento total do comprimento dos túbulos seminíferos, a taxa de proliferação das células de Leydig entre os animais de 2-3 anos é 1:12, enquanto entre os animais de 13-20 anos diminui, mas ainda se mantém em 1:4.

Relacionando a avaliação biométrica e a maturidade sexual, Thompson et al. (1979) propõem a idade à maturidade sexual para os garanhões igual ou superior a sete anos. Em sua pesquisa, os animais avaliados foram divididos em 3 grupos etários, onde a média da largura escrotal total dos adultos ($G_{III} \geq 07$ anos) foi significativamente maior que os animais mais jovens.

2.5 Curva de Crescimento

Dentro do contexto biológico, o crescimento de um organismo é um fenômeno complexo, pois envolve diversos fatores intrínsecos e extrínsecos ao indivíduo. Portanto, é um desafio estudá-lo e, principalmente, estabelecer medidas diretas e definidas (ROBISON, 1976).

As curvas de crescimento são caracterizadas por correlacionar medidas de tamanho (por exemplo, peso, altura, largura, volume) com a idade, proporcionando uma descrição visual do crescimento, sendo que a interpretação fornece explicação do que está ocorrendo biologicamente (KSHIRSAGAR & SMITH, 1995).

Há ampla variedade de modelos matemáticos disponíveis para esse fim. Gompertz (1825), Hill (1910), Michaelis-Menten (1913), Brody (1945), Richards (1959), Von Bertalanffy (1957) e Meloun et al. (1996) são alguns dos autores responsáveis por descrever modelos matemáticos. Portanto, análises experimentais comparando-os são necessárias para auxiliar na escolha do modelo mais apropriado, pois deve-se considerar as diferenças biológicas entre as espécies (BROWN et al., 1976).

É notória a disparidade da sua utilização dentro dos experimentos envolvendo os animais de produção, uma vez que a descrição da curva de crescimento por meio dos modelos matemáticos tem sido amplamente utilizada em estudos envolvendo os bovinos de corte (QUIRINO, 1999; VALENTIM et al., 2002; SANTORO et al., 2005; NIETO et al. 2006; MACHADO et al., 2012; HENRY et al., 2013; LOAIZA-ECHEVERRI et al., 2013; OKANO et al., 2018; PENITENTE-FILHO et al., 2018, 2019), mas são raramente utilizadas em cavalos

(SANTOS et al., 1999; RUA, 2014; RUA et al., 2016; SANTIAGO et al., 2016; SOUZA, 2017; RIBEIRO et al., 2018).

As poucas pesquisas a respeito do tema, em sua maioria, tratam-se de curva de crescimento em relação ao peso, à altura de cernelha e ao perímetro torácico (SANTOS et al., 1999; RUA, 2014; RUA et al., 2016; SANTIAGO et al., 2016; SANTOS, 2017; RIBEIRO et al., 2018). A altura é necessária para a descrição e classificação dos cavalos; enquanto o perímetro torácico, característica utilizada para aferir o peso dos cavalos (LUCENA, 2011), está diretamente relacionada à condição física do animal (REED & DUNN, 1977; HICKMAN & COLLIS, 1984). Porém, não foram encontradas pesquisas relacionadas às curvas de crescimento da biometria testicular em garanhões.

A interpretação biológica de um modelo inclui a habilidade de classificar um indivíduo em uma característica biológica importante para os programas de seleção, por exemplo a taxa de crescimento, a idade à puberdade e à maturidade sexual e as possíveis correlações com a estrutura corporal do animal (altura de cernelha e peso corporal à diferentes faixas etárias).

Nas outras espécies extensivamente estudadas, como os bovinos, o comportamento comum da curva de crescimento testicular é representado por uma curva sigmoide. Isto é, no início, fica evidente uma fase de crescimento lento, seguido por um período cuja velocidade de crescimento é acelerada, culminando em um pico de aceleração, o qual representa a puberdade; e logo após a velocidade de crescimento se reduz, indicando que o animal está finalizando o seu desenvolvimento, até atingir a maturidade (BERGMANN et al., 1998).

A curva sigmoide pode ser representada de três formas: estático, seccional-cruzado e longitudinal (FITZHUGH JR., 1976). No tipo estático, a característica selecionada é observada uma única vez dentro de um grupo de animais com mesma idade ou estágio de desenvolvimento. No tipo seccional-cruzado, a característica também é mensurada uma única vez, porém a faixa etária do grupo em avaliação é estendida, de forma a abranger outros estágios de desenvolvimento dos animais. No tipo longitudinal, todas as mensurações são obtidas do mesmo animal ao longo de um período, o que permite acompanhar o progresso dos estágios de desenvolvimento deste indivíduo.

Uma das formas de descrever as curvas de crescimento é por meio dos modelos não-lineares. Eles têm se mostrado mais adequados quando comparados aos modelos lineares, pois possibilitam a síntese de uma série de dados contidos em um período de tempo em alguns

parâmetros biologicamente interpretáveis (EISEN, 1974), tornando mais viável a compreensão sobre o padrão de crescimento, como no desenvolvimento testicular.

2.6 Modelos não-lineares

Segundo Draper e Smith (1998) as funções matemáticas empregadas na confecção das curvas de crescimento são denominadas modelos de regressão, sendo estas classificadas como: modelos lineares, não lineares e os linearizáveis. Os modelos não-lineares apresentam duas grandes vantagens em relação aos lineares: sintetizam um vasto conjunto de dados em alguns parâmetros e permitem a interpretação biológica dos mesmos (LOAIZA-ECHEVERRI et al., 2013). Diferentes modelos não-lineares estão disponíveis para estimar os parâmetros do desenvolvimento testicular, sendo que eles possuem diferenças nos ajustes estatísticos. Além disso, possibilitam a formação das curvas de crescimento testicular e corporal, em função da idade. Sendo assim, a escolha do melhor modelo não deve considerar somente as particularidades do modelo matemático, mas também a concordância entre os resultados e as interpretações biológicas. As funções logística, Gompertz, von Bertalanffy e Richards têm várias aplicações na área biológica, em especial no crescimento de animais e de plantas (CARVALHO et al., 2014).

Em 1908, Robertson iniciou os estudos sobre a função matemática, a qual, mais tarde, foi denominada como modelo de Brody, após outros pesquisadores continuarem o desenvolvimento da função -Brody em 1945 e Von Bertalanffy em 1957 (DUARTE, 1975; MAZZINI, 2001). Neste modelo, o ponto de inflexão coincide com o nascimento, uma vez que o parâmetro β_4 (a constante que define a forma da curva), assume o valor de um (1), resultando em uma curva não sigmoide. Sendo assim, descreve o crescimento animal ocorrido após o ponto de inflexão.

O modelo de Gompertz foi desenvolvido por Benjamin Gompertz, em 1825 (OLIVEIRA, 1995). Um dos primeiros a utilizá-lo para descrever o crescimento animal foi Winsor, em 1931. Este modelo demonstra o comportamento sigmoide, assumindo que o crescimento é proporcional ao peso do organismo e, ao atingir o ponto de inflexão, a velocidade de crescimento diminui (FRANCE et al., 1996). O ponto de inflexão nesse modelo é fixado em 0,37 do valor de β_1 (PAZ, 2002).

Em 1910, a equação de Hill foi proposta para a avaliação dos fenômenos fisiológicos, com o objetivo principal de previsão do efeito máximo. Posteriormente, seu uso foi expandido

para outros tipos de estudos. Segundo Goutelle et al. (2008) é o modelo que aparenta ser largamente flexível em ajustar os dados.

O modelo Logístico proposto por Verhulst, em 1838, para expressar a lei do crescimento de populações humanas (LAIRD, 1966) apresenta curva sigmoide e simétrica em relação ao ponto de inflexão. Neste modelo, o ponto de inflexão é fixado em 50 % do valor assintótico (NOTTER et al., 1985).

Em 1996, Meloun e Militk utilizaram o modelo de Mitscherlich e outros modelos não lineares para descrever o crescimento da estrutura auricular de fetos. Por efeito da grande flexibilidade apresentada, estes modelos puderam ser expandidos para descrição das curvas de crescimento de animais (SILVEIRA, 2010).

Michaelis e Menten propuseram um modelo para descrever a cinética de reações químicas (MICHAELIS e MENTEN, 1913), sendo que este não apresenta ponto de inflexão. Atualmente, a aplicação desse modelo acontece em diversos contextos, como na avaliação de crescimento animal (SOUZA et al., 2013). A difusão do modelo original de Michaelis-Menten com o objetivo de descrever curvas de crescimento sigmóides demonstrou que o modelo proposto se ajustou muito bem para avaliar dados de peso corporal e idade de várias espécies animais, apresentando resultados similares aos modelos Gompertz e Richards (LOPEZ et al., 2000). Além disso, o parâmetro β_2 pode ser considerado como indicativo de precocidade sexual (OKANO et al., 2018; PENITENTE-FILHO et al, 2018)

Ludwing Von Bertalanffy (1938) apresentou sua equação ao descrever o crescimento de peixes. A característica principal deste modelo consiste na fixação do ponto de inflexão em aproximadamente 30% do tamanho assintótico. Ele fundamentou seus estudos na hipótese de que a taxa do crescimento está na diferença entre as taxas de anabolismo e catabolismo dos tecidos (FORNI, 2007). Logo, este modelo tem o mais rigoroso suporte nas teorias biológicas, o que lhe confere melhor acurácia na interpretação de seus parâmetros (DUARTE, 1975; MAZZINI, 2001).

Assim, a utilização dos modelos não-lineares para especificação da curva de crescimento é de extrema importância no direcionamento dos programas de seleção genética, uma vez que descrevem relação funcional entre peso corporal e idade (SILVA et al., 2001), além de possibilitar a explicação biológica dos parâmetros compreendidos nestes modelos matemáticos.

2.7 Qualidade de Ajuste

Alguns requisitos precisam ser atendidos para que o modelo de regressão não-linear descreva adequadamente a relação entre a variável e a idade: interpretação biológica dos parâmetros, alta qualidade de ajuste e facilidade de convergência (FITZHUGH JR., 1976).

Os parâmetros que avaliam a qualidade de ajuste entre as comparações de modelos não lineares são: critério de informação de Akaike corrigido - AICc (BOZDOGAN, 1987), o critério de informação Bayesiana – BIC (SCHWARZ, 1978), Coeficiente de Determinação ajustado – Adj. R^2 -, a soma dos quadrados dos erros – ESS (LOAIZA-ECHEVERRI et al., 2013), o erro absoluto médio – MAD (MENTZER & BIENSTOCK, 1998) e erro percentual absoluto médio – APE (LOAIZA-ECHEVERRI et al., 2013).

REFERÊNCIAS

ANGUS, O. MCKINNON; EDWARD, L. S.; WENDY, E.V.; DICKSON, D. V. **Equine Reproduction**. 2^a (ed). ed. Angus, O., Mckinnon. 3310 p. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS CRIADORES DO CAVALO MANGALARGA MARCHADOR – ABCCMM. **Arquivos**. Belo Horizonte: ABCCMM, 2010.

BAILEY T. L., MONKE D.; HUDSON R. S.; WOLFE D. F.; CARSON R. L.; RIDDELL M. G. Testicular shape and its relationship to sperm production in mature Holstein bulls. **Theriogenology**, v. 46, p. 881-887, 1996.

BERBARI NETO, F. **Evolução de medidas lineares e avaliação de índices morfométricos em garanhões da raça Campolina**. 2005. 90 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, 2005.

BERGMANN, J. A. G. Indicadores de precocidade sexual em bovinos de corte. **In:** Congresso Brasileiro das Raças Zebuínas, 3. 1998; Uberaba, Brasil. Proceedings, p.145-155, 1998.

BILGIN O. C.; EMSEN E.; DAVIS M. E. Comparison of nonlinear models for describing the growth of scrotal circumference in Awassi male lambs. **Small Ruminant Research**, v. 52, p. 155-160, 2004.

BLANCHARD T. L.; BRINSKO S. P.; VARNER D. D.; HURTGEM J. P. Evaluation of testicular size and Function **In:** 1-3-year-old Stallions. Proceedings of the Annual Convention of the AAEP. v.47, p.232-235, 2001.

BORGES, G. S.; VAZ DE MELLO, M. I.; MAMBRINI, J. V. M.; SOECK, P. P. N. Biometria testicular de garanhões da raça Campolina. B. **Indistr. Anim.**, N. Odessa, v. 67, n. 2, p.157-162, 2010.

BORTON, A. Biología del caballo. **In:** HINTZ , H. F.; EVANS, J. W.; BORTON, A.; VLECK, D. 1. ed. El Caballo. Zaragoza: Acribia, v. 1, cap. 13, p. 233-334, 1979.

BOZDOGAN, Hamparsum. Model selection and Akaike's information criterion (AIC): The general theory and its analytical extensions. **Psychometrika**, v. 52, n. 3, p. 345-370, 1987.

BRINKS J. S. Relationships of scrotal circumference to puberty and subsequent reproductive performance in male and female offspring. **In:** FIELDS M.J.; SAND R.S., editors. Factors affecting calf crop. Boca Raton: CRC, p. 363–370, 1994.

BRINSKO, S. P. *et al.* **Examination of the Stallion for Breeding Soundness** (cap 13). 2011.

BRODY, S. **Bioenergetics and Growth, With Special Reference to the Efficiency Complex in Domestic Animals**. Reinhold Publishing Co, New York, 1945.

BROWN, John Ed. **Recall and recognition**. John Wiley & Sons, 1976.

CABRAL, G. C.; ALMEIDA, F. Q. D.; QUIRINO, C. R.; AZEVEDO *et al.* Avaliação morfométrica de equinos da raça Mangalarga Marchador: índices de conformação e proporções corporais. **Revista Brasileira de Zootecnia**, 33, 1798-1805, 2004.

CARNEIRO, G. G.; FONTES, L. R.; PEREIRA, H. C. Informações preliminares sobre o cavalo Mangalarga Marchador. **Arch. Esc. Sup. Vet.**, v.5, p.5-9, 1952.

CARVALHO, L. R.; PEREIRA, G. M. S.; SILVA, H. D. O. F. *et al.* Ajustes de modelos não lineares de efeitos fixos, com ponderação e misto-aplicações. **Rev. Bras. Biometric**, v.32, p.296-307, 2014.

COLENBRANDER B.; PUYK H.; ZANDEE A. R.; PARLEVLIIET J. Evaluation of the stallion for breeding. **Acta Vet Scand Suppl.** v. 88, p. 29–37, 1992.

COSTA, M. D.; BERGMANN, J. A. G.; REZENDE, A. S. C. Caracterização demográfica da raça Mangalarga Marchador. **Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.**, v.56, n.5, p.687-690, 2004.

COULTER G. H.; FOOTE R. H. Bovine testicular measurements as indicators of reproductive performance and their relationship to productive traits in cattle: a review. **Theriogenology** . v.11, p. 297–311, PMID: 16725414, 1979.

DRAPER, Norman R.; SMITH, Harry. An introduction to nonlinear estimation. **Applied regression analysis**, p. 505-565, 1998.

DUARTE, F. A. M. **Estudo da curva de crescimento de animais da raça “Nelore” (Bos taurus indicus) através de cinco modelos estocásticos**. 1975. 284 p. Tese (Livre Docência

em Genética e Matemática Aplicada à Biologia) - Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 1975.

EISEN, E. J. Results of growth curve analyses in mice and rats. **Journal of Animal Science**, v.42, n.4, p.1008-1023, 1974.

ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA LUIZ DE QUEIROZ – ESALQ. Estudo do Complexo do Agronegócio Cavalos no Brasil. Brasília: CEPEA. 68p. (Coletânea de Estudos Gleba; n. 40). 2006.

FITZHUGH, J.R.A. Analysis of growth curves and strategies for altering their shapes. **Journal Animal Science**, v. 33, p.1036-1051, 1976.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. Disponível em: <http://faostat.fao.org/site/573/DesktopDefault.aspx?PageID=573#ancor>
Acesso em: 03 de outubro de 2019.

FRANCE, J.; DIJKSTRA, J.; DHANOA, M.S. Growth functions and their application in animal science. **Annales Zootechnie**, v.45, p.165-174, 1996.

FREITAS, B. W. **Parâmetros fisiológicos e seminais de garanhões da raça Mangalarga Marchador na região da Zona da Mata Mineira do decorrer das estações climáticas**. 2010. Dissertação (Mestrado em Medicina Veterinária) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.

GARCIA, F. P. S. et al. Determinação do crescimento e desenvolvimento de potros puro sangue inglês em Bagé-RS. **Revista Portuguesa de Ciências Veterinárias**, Lisboa, v.106, p. 43-46, 2011.

GOMPERTZ, B. On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies. **Philosophical transactions of the Royal Society of London**, v. 115, p. 513-83, 1825.

GOUTELLE, S.; MAURIN, M.; ROUGIER, F.; BARBAUT, X.; BOURGUIGNON, L.; DUCHER, M. et al. The Hill equation: a review of its capabilities in pharmacological modelling. **Fundamental and Clinical Pharmacology**, v. 22, p. 633-648, 2008.

HAFEZ, E. S. E. Anatomia da reprodução masculina. HAFEZ, E. S. E.; HAFEZ, B. **Reprodução animal**. 7ª ed. Barueri, SP: Manole, cap. 1, p. 3-12, 2004.

HENINGER, N. L. Puberty. **In:** MCKINNON, Angus O. et al. (Ed.). Equine reproduction. John Wiley & Sons, p.1015-1025, 2011.

HENRY, M. et al. Scrotal circumference growth curves of buffalo bulls of different breeds raised in Brazil. **Buffalo Bulletin**, v. 32, p. 439– 442, 2013.

HESS, M. F.; ROSER, J. F. A comparison of the effects of equine luteinizing hormone (eLH), equine growth hormone (eGH) and human recombinant insulin-like growth factor (hrIGF-I) on steroid production in cultured equine Leydig cells during sexual maturation. **Animal reproduction science**, v. 89, n. 1-4, p. 7-19, 2005.

HICKMAN, J.; COLLIS, C. Measurement of horses. **The Veterinary Record**, v.114, p.491-493, 1984.

HILL, A. V. The possible effects of the aggregation of the molecules of haemoglobin on its dissociation curves. **J. Physiol.**, v. 40, p. 4-7, 1910.

HONTANG, M. A. **Psicologia do Cavalo**. 1 ed. São Paulo: Globo S.A., 1989.

JOHNSON, L.; THOMPSON J.R., DONALD L. Age-related and seasonal variation in the Sertoli cell population, daily sperm production and serum concentrations of follicle-stimulating hormone, luteinizing hormone and testosterone in stallions. **Biology of Reproduction**, v. 29, n. 3, p. 777-789, 1983.

JORDÃO, L. P.; CAMARGO, M. X. Estudo sobre algumas medidas do cavalo Mangalarga criado na Coudelaria Paulista. **Bol. Ind. Anim.**, v.11 (3/4): p. 81-95, 1950.

KENNEY R. M.; *et al.* Theriogenology and the equine. Part II. The stallion: semen examination. **J Soc Theriogenol**, v. 9, p. 1100–1110. 12, 1983.

KNIGHTS S. A.; BAKER R. L.; GIANOLA D.; GIBB J. B. Estimates of heritabilities and of genetic and phenotypic correlations among growth and reproductive traits in yearling Angus bulls. **J Anim Sci**, v. 58(4), p. 887- 893, PMID: 6725151, 1984.

KSHIRSAGAR, A.; SMITH, W. Growth curves. **CRC Press**, 1995.

LAIRD A. K. Postnatal growth of birth and mammals. **Growth**, v. 30, p. 349-363. 1966

LOAIZA-ECHEVERRI, A. M. et al. Use of nonlinear models for describing scrotal circumference growth in Guzera bulls raised under grazing conditions. **Theriogenology**, v. 79, p. 751-759, 2013.

LOPEZ, S.; FRANCE, J.; GERRITS, W.J.; DHANOA, M.S.; HUMPHRIES, D.J.; DIJKSTRA, J. A generalized Michaelis-Menten equation for the analysis of growth. **Journal of Animal Science**, v.78, p.1816-1828, 2000.

LOVE, C. C.; GARCIA, M. C.; RIERA, F. R.; KENNEY, R. M. Use of testicular volume to predict daily sperm output in the stallion. **In: Proceedings Of Annual Convention Of The American Association Of Equine Practitioners**, p. 15–20, 1990.

LUCENA, J. E. C. **Avaliação e evolução de índices morfométricos de Fêmeas, machos e castrados da raça Campolina**. 2011.Tese (Doutorado em Ciência Animal) – Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias. Universidade Estadual Do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, 2011.

LUNSTRA, D. D. Testicular development and onset of puberty in beef bulls. **In: Beef Research Program Progress Report**, v.1, p. 26, 1982.

LUNSTRA, D. D.; FORD, J. J.; ECHTERNKAMP, S. E. Puberty in beef bulls: hormone concentrations, growth, testicular development, sperm production and sexual aggressiveness in bull of different breeds. **Journal Animal Science**, v. 46, p.1054–1062, PMID: 566747, 1978.

MACHADO, P. P.; SOUSA, A. L.; REIS, L. F.; CHAVES, R. M. Modelos matemáticos e correlações de medidas morfométricas testiculares de bovinos zebuínos e azebuados abatidos em São Luís, MA. **Revista Bras Reprod Anim**, v.36, p.51-61, 2012.

MAGNUSSON, L. E.; THAFVELIN, B. Studies on the conformation and related traits of Standardbred trotters in Sweden. **Journal of Animal Breeding and Genetics**, v. 107, n 1-6, p. 135-148, jan. 1990.

MANSO FILHO, H. C. *et al.* Testicular Measurements in Campolina Stallions. **Journal of Equine Veterinary Science**, p. 277-278, 2000.

MARCENAC, L. N.; AUBLET, H.; AUTHEVILLE, P. **Enciclopédia do cavalo**. 2v. 4 ed. São Paulo: Org. Andrei, 1990.

MAZZINI, A. R. A. **Estudo da curva de crescimento de machos Hereford**. 2001. 47 p. Dissertação (Estatística e Experimentação Agropecuária) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.

MELOUN, M.; MILITKÝ, J. Sbirka uloh, Statisticke zpracovani experimentalnich dat. Pardubice: Universita Pardubice. 1996. Disponível em: <https://meloun.upce.cz/docs/books/ucebnice.1994.pdf> Acesso em: 20/04/2018.

MENDES, L. Q. **Aspectos biométricos e histológicos de testículos de garanhões da raça crioula**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciências Veterinárias). Universidade Federal do Rio Grande do Sul – RS, 2012.

MENTZER, John T.; BIENSTOCK, CAROL C. **Sales forecasting management: understanding the techniques, systems and management of the sales forecasting process**. SAGE Publications, Incorporated, 1998.

MICHAELIS, L.; MENTEN, M. L. Die kinetik der invertinwirkung. **Biochemische Zeitschrift**, v. 49, p. 334-6, 1913.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL-NRC, 2007. **Nutrient Requirements of Horses**, United States of America: Washington DC. 2007.

NADEN, J., AMANN, R. P., SQUIRES, E. L. Testicular growth, hormone concentrations, seminal characteristics and sexual behaviour in stallions. **Journal of Reproduction and Fertility**. v. 88, p. 167-176, 1990

NIETO, L. M.; SILVA, L. O. C.; GONDO, A. Análise da curva de crescimento do perímetro escrotal de touros Canchim em diferentes sistemas de criação. **Arquivos de Ciências Veterinárias e Zoologia da Unipar**, v. 9, p. 99-103, 2006.

NOTTER, D. R.; LUCAS, J. R.; MCCLAUGHERTY, F. S.; COPENHAVER, J. S. Breed group differences in testicular growth patterns in spring-born ram lambs. **Journal Animal Science**, v. 60, p. 622-631, PMID: 3988639, 1985.

NOTTER, D.R.; McFADDEN, L.G.; BERGMANN, J.A. G. Relationship between yearling scrotal circumference and measures of female reproduction in Angus cattle. **In: BEEF IMPROVEMENT FEDERATION - BIF**, 25., 1993, Asheville, North Carolina. Proceedings... Asheville, North Carolina. Arville, FIF, 1993, p. 180-184, 1993.

OKANO, D. S., PENITENTE-FILHO, J. M., DÍAZ, E. A., MAITAN, P. P., WADDINGTON, B., SILVA, D. E. C., & GUIMARÃES, J. D. Fitting nonlinear models to describe scrotal circumference growth in Montana Tropical composite bulls. **In:** Reunião Anual da ABBRA. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Jurandy_Penitente-Filho/publication/326464569_Fitting_nonlinear_models_to_describe_scrotal_circumference_growth_in_Montana_Tropical_composite_bulls/links/5b4f5ec20f7e9b240febf38d/Fitting-nonlinear-models-to-describe-scrotal-circumference-growth-in-Montana-Tropical-composite-bulls.pdf?origin=publication_detail. Acesso em: 09/10/2019

OLIVEIRA, H. N. **Análise genético-quantitativa da curva de crescimento de fêmeas da raça Guzerá**. 1995. 72 f. Tese (Doutorado em Genética) – Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 1995.

OLIVEIRA, R. R. **Parâmetros reprodutivos de garanhões da raça Mangalarga Marchador em função da faixa etária** (comportamento, biometria testicular, aspectos seminais, resistência ao refrigeração e congelamento de sêmen). 2014. Tese (Doutorado em Zootecnia). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2014.

PAZ, C. C. P. **Associação entre polimorfismos genéticos e parâmetros da curva de crescimento em bovinos de corte**. 2002. 107 f. Tese (Doutorado em Melhoramento Animal) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2002.

PENITENTE-FILHO, J. M.; SILVA, F. F.; GUIMARÃES, S. E. F.; NETO, T. M.; COSTA, E. P.; SIQUEIRA, J. B.; FREITAS, B. W.; GUIMARÃES, J. D. Use of nonlinear mixed models for describing testicular volume growth curve in Nellore bulls. **Theriogenology**, v. 133, p. 65-70, ISSN 0093-691X, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2019.04.026>. Acesso em: 06/03/2019

PENITENTE-FILHO, J. M.; VILLADIEGO, F. A. C.; SILVA, F. F.; CAMILO, B. S.; LEON, V. G.; PEIXOTO, T. et al. Can scrotal circumference-based selection discard bulls with good productive and reproductive potential? **PLoS One**, 13(3), e0193103, 2018. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5832217/>. Acesso em: 06/03/2019

PICKETT, B.W. Reproductive evaluation of the stallion. In: MCKINNON, A. O.; VOSS, J. L. (Eds.). Philadelphia: Lea & Febiger, p. 755-768, 1993.

PINTO, L. F. B. *et al.* Análise multivariada das medidas morfométricas de potros da raça Mangalarga Marchador: análise fatorial. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.34, n. 2, p. 613-626, 2005.

PLANALTO (DF). Decreto n. 12975, de 19 de maio de 2014. Dispõe sobre a declaração do cavalo Mangalarga Marchador como raça nacional. Dilma Rousseff, 193º da Independência e 126º da República. 2014. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/CCIVIL_03/_Ato2011-2014/2014/Lei/L12975.htm. Acesso em: 15/06/2019.

QUIRINO, C. R.; BERGMANN, J.A.G.; VALE FILHO, V.R.; ANDRADE, V.J.; PEREIRA, J.C.C. Evaluation of four mathematical functions to describe scrotal circumference maturation in Nellore bulls. **Theriogenology**, v. 52, p. 25-34, 1999.

REED, K. R.; DUNN, N. K. Growth and development of the Arabian horse. **In: EQUINE NUTRITION AND PHYSIOLOGY SYMPOSIUM**, 1977, St. Louis. Proceedings... Philadelphia: ENP Society, p.76-98, 1977.

REZENDE, A. S. C. et al. Efeito de nível do concentrado suplementar sobre o crescimento de potros pós-desmama. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, Belo Horizonte, v.38, n.6, p.927-941, 1984.

REZENDE, A. S. C. *et al.* Efeito de Dois Diferentes Programas Nutricionais sobre o Desenvolvimento Corporal de Potros Mangalarga Marchador. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 29, n. 2, p. 495-501, 2000.

RIBEIRO, R. A. *et al.* Curva de crescimento em altura na cernelha de equinos da raça Mangalarga Marchador considerando-se heterocedasticidade. **Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.**, Belo Horizonte, v. 70, n. 1, p. 272-278, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-4162-9322>. Acesso em: 13/04/2019

RICHARDS, F.J. A flexible growth function for empirical use. **J Exp Bot**, v. 10, p. 290-301, 1959.

ROBALO SILVA, J.; AGRÍCOLA, R.; BARBOSA, M.; LOPES da COSTA, L. Variação sazonal do volume testicular, da produção e qualidade do sêmen e do comportamento sexual de cavalos Lusitanos. **Revista Portuguesa de Ciências Veterinárias**, v. 102, p. 119-125, 2007.

ROBISON, D.W. Growth patterns in swine. **J. Animal Science**, v.42, p. 1024-1035, 1976.

ROSER, J. F. Testicular Function and Fertility. **Journal of Equine Veterinary Science**, v.20, n.2, p. 90-93, 2000.

RUA, M. A. S. **Biometria testicular, avaliação do sêmen e do comportamento sexual de garanhões do norte do estado do Rio de Janeiro**. 2014. Dissertação (Mestrado em Produção Animal). Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias. Universidade Estadual Do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, 2014.

RUA, M. A. S. *et al.* Repetibilidade das características seminais, espermáticas e fertilidade de garanhões. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 11, n. 2, p. 124-131, 2016.

SALVADOR, D. F. **Perfis andrológicos, de comportamento sexual e desempenho reprodutivo de touros Nelore desafiados com fêmeas em estro sincronizado**. 2001. 53f. (Mestrado em Medicina Veterinária) – Escola de Veterinária, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2001.

SANTIAGO, J. M. *et al.* Evolution of morphometric measures in the Mangalarga Marchador breed. **Rev. Caatinga**, v.29, p.191-199, 2016.

SANTORO, K. R. *et al.* Estimativas de parâmetros de curvas de crescimento de bovinos Zebu, criados no Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 34, n. 6, p. 2262-2279, 2005.

SANTOS, S. A. **Estudo sobre algumas características de crescimento de cavalos Brasileiro de Hipismo produzidos no haras Pioneiro**. 1989. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 1989.

SANTOS, S. A.; OLIVEIRA, M. R. D.; SERENO, J. R. Using nonlinear models to describe height growth curves in pantaneiro horses. **Pesqui. Agropecu. Bras.** v.34, p.1133-1138, 1999.

SANTOS, M. R. **Avaliação de metodologias para a biometria equina**. 2017. Dissertação (Mestrado em Zootecnia). Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC Oeste), SC, 2017.

SCHADE, M. F. S.; MENEGATTI, J.; SCHADE, J.; SOUZA JÚNIOR, V. A. ; FONTEQUE, J. H. Avaliação morfométrica de equinos do Esquadrão de Polícia Montada dos municípios de Lages, Joinville e Florianópolis-SC. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 67, p.1335-1342, 2015.

SCHWARZ G. Estimating the dimension of a model. **Annals of Statistics** 1978;6:461-4

SILVA, F. F.; AQUINO, L. H.; OLIVEIRA, A. I. G. Influência de fatores genéticos e ambientais sobre as estimativas dos parâmetros de funções de crescimento em gado Nelore. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.25, n.5, p.1195-1205, 2001.

SILVEIRA F.G. **Classificação multivariada de modelos de crescimento para grupos genéticos de ovinos de corte**. M.Sc. Tese, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, 2010. Disponível em: <http://locus.ufv.br/handle/123456789/4027>.

SILVEIRA, F.; SILVA, F. F.; CARNEIRO, P. L. S.; MALHADO, C. H. M. Classificação multivariada de modelos de crescimento para grupos genéticos de ovinos de corte. **Rev Bras Saúde Prod Anim**, v. 13, p. 62-73, 2012.

SOUZA, F. A. C. **Curvas de crescimento em equinos da raça Mangalarga Marchador utilizando método transversal**. 2017 Dissertação (Mestrado em Zootecnia). Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2017.

SOUZA, L. A.; CARNEIRO, P. L. S.; MALHADO, C.H.M.; SILVA, F.F.; SILVEIRA, F.G. Traditional and alternative nonlinear models for estimating the growth of Morada Nova sheep. **Revista Brasileira Zootecnia**, v. 42, p.651-655, 2013.

STOUT, T. A. E.; COLENBRANDER, B. Reproductive Parameters of Draft Horse, Friesian and Warmblood Stallions. **In**: MCKINNON, Angus O. et al. (Ed.). Equine reproduction. John Wiley & Sons, p. 1362-1366, 2011.

THOMPSON, D. J.; PICKETT, B. W.; SQUIRES, E. L.; AMANN, R. P. Testicular measurements and reproductive characteristics in stallion. **Journal of Reproduction and Fertility**, v. 27, p. 13-17, 1979.

TOELLE Y. D., ROBISON O. W. Estimates of genetic correlations between testicular measurements and female reproductive traits in cattle. **J Anim Sci**; v. 60, p. 89–100, PMID: 3972752, 1985.

UNANIAN M. M.; SILVA A. E. D. F.; MCMANUS C.; CARDOSO E. P. Características Biométricas Testiculares para Avaliação de Touros Zebuínos da Raça Nelore [Testicular Biometrics Characteristics to Evaluate the Nellore Zebu Breed Bulls]. **Rev Bras Zootec.**, v. 29, p.136–144, 2000.

VALENTIM, R. *et al.* Biometria testicular de touros Nelore (*Bos taurus indicus*) e touros cruzados Nelore-europeu (*Bos taurus indicus* x *Bos taurus taurus*) aos 20 e 24 meses de idade.

Braz. J. Vet. Res. Anim. Sci., São Paulo , v. 39, n. 3, p. 113-120, 2002 . Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-95962002000300001>. Acesso em: 25/10/2018

VARNER D. D.; SCHUMACHER J.; BLANCHARD T. L.; JOHNSON L. Disease and management of breeding stallions. **American Veterinary Publications**, Sta Barbara, p. 349, 1991.

VON BERTALANFFY, L. Quantitative laws for metabolism and growth. **Q Rev Biol**, v.32, p. 217-231, 1957.

NONLINEAR MODELS TO DESCRIBE THE GROWTH CURVES OF TESTICULAR BIOMETRICS AND MORPHOMETRIC TRAITS OF MANGALARGA MARCHADOR STALLIONS

ABSTRACT

This study aimed to describe the testicular growth curve of testicular biometrics and body morphometry in Mangalarga Marchador stallions, adjusting nonlinear models to total scrotal width (TSW), testicular volume (TV), body weight (BW) and withers height (WH). A cross-sectional study was conducted with 120 stallions, aging from 638 to 8006 days old. The estimated parameters of nonlinear models (Brody, Gompertz, Hill, Logistic I and II, Meloun I and II, Michaelis-Menten, Mitscherlich and von-Bertalanffy) were estimated by the Gauss-Newton iterative process. The goodness of fit was evaluated by the corrected information criteria of Akaike (AICc) and Bayesian (BIC), Adjusted R^2 , error sum of square (ESS), mean absolute deviation (MAD) and average prediction error (APE). Based on the goodness of fit, the Logistic I model better for the growth curve of TSW, BW and WH; while Logistics II proved to be the best model for the TV growth curve. Despite the high and positive correlation between TSW and TV ($r = 0.85$), the evaluation of testicular development by only TSW does not fully describe the stages of development of the testicles, since it does not consider the growth of other biometric measures, especially the testicular height that maintains growth for a longer period. Therefore, to determine the testicular development phase that the stallion is through biometric evaluation, the best option is to evaluate all testicular measurements and thus obtain the TV as well, as it is the most reliable measure in relation to the stage of testicular development. In addition, the moderate and positive correlation between WH with TSW and TV ($r = 0.51$ for both) indicates that biometric and morphometric characteristics are associated, so testicular biometry can be included in the genetic selection programs of Mangalarga Marchador stallions with the same relevance as the morphometric characteristics.

Keywords: Mangalarga Marchador stallions, testicular biometrics, body morphometry, nonlinear models, growth curves.

1 INTRODUCTION

The Mangalarga Marchador horse, with approximately 200 years of selection and declared as a Brazilian national breed (declaration n°. 12.975/2014), shows as main characteristic to be a suitable animal for long periods of riding, due to the comfortable progress generated by gait. There are other relevant features as well, such as endurance, elegant size, beauty and docile temperament.

The knowledge of the reproductive parameters of different breeds is very important for the identification of individuals with high and low reproductive potential, as well as to guide important productive decisions. Within this context, testicular biometry is widely used in farm animals, mainly the scrotal circumference (SC), due to the middle to high estimates of heritability (LUNSTRA, 1982; KNIGHTS et al., 1984; BRINKS, 1994; LOAIZA-ECHEVERRI et al., 2013), in addition to favorable correlations with other reproductive and productive characteristics, in both males and females (COULTER & FOOTE, 1979; TOELLE & ROBISON, 1985; NOTTER et al., 1993).

However, SC is not possible to be measured in horses, due to the horizontal positioning of the testes. Therefore, to better estimate the testicular size of the stallion and, consequently, evaluate its reproductive capacity (THOMPSON et al., 1979; LOVE et al., 1990; PICKETT et al., 1993; STOUT & COLENBRANDER, 2011), the measurement of total scrotal width (TSW) and testicular volume (TV), the second one by measuring testicular width, length and height, might be considered. Testicular length, width and height might be used to estimate TV in stallions (Love et al., 1990) and bulls, as important as TSW, since TV has a high correlation with the production of sperm (LOVE et al., 1990; ROBALO SILVA, 2007; FREITAS, 2010; ANGUS et al., 2011).

Although morphometric research is very associated with productivity in cattle and sheep, in equine production systems, morphometric evaluations are relevant for the genetic improvement of herds because they are related to functionality of the species. The Mangalarga Marchador horse has as a peculiar characteristic the gait, which is resulting from the neuromotor coordination of movements, training and appropriate morphometric measures (PINTO et al., 2005).

Growth curves are characterized by correlating size measurements with age, providing a visual description of growth with biological interpretation (KSHIRSAGAR & SMITH, 1995). One of the ways to describe growth curves is by nonlinear models. These have been shown to

be more appropriate when compared to linear models, as they allow evaluating a large number of measures of different parameters, besides enabling the biological explanation of the results (LOAIZA-ECHEVERRI et al., 2013). Biological interpretation includes the ability to qualify an individual according to the evaluated traits by selection programs.

In this context, the main objective of this paper was to describe testicular growth curve by fitting nonlinear models to measurements of TSW, TV, BW and WH in a cross-sectional study. Therefore, this study was to indicate the possible phenotypic correlations between morphometric measurements and reproductive characteristics

2 MATERIAL AND METHODS

2.1 Ethics and Animals

This project (n° 196159) was submitted and approved by the Ethics Committee for the Use of Animals - CEUA/UFV, whose protocol number is 86/2018, on December 20, 2018.

The evaluations were carried out in the field, on 30 farms located within a radius of 50 km around the city of Cruzília (21° 50' 19" S and 44° 48' 30" W), Minas Gerais, Brazil. Data were collected in September 2018 at the onset of the breeding season for equine species.

Data were collected from 120 Mangalarga Marchador stallions, all recorded by the *Associação Brasileira de Criadores de Cavalos Mangalarga Marchador* (ABCCMM), within a wide age group (1,7 to 21,9 years). All animals were in good body condition during the study. The data for the stallions, according to the age group, are shown in Table 1.

Table 1 - Number of Mangalarga Marchador stallions by age-group.

Group	I	II	III
N	36	41	43
Age	< 04	4 e 8	> 8

During the data collection period, the animals were confined for a short time, so there was no change in their conditioning on the farm; stallions that were housed in picket, remained on the picket and those who were in stalls were kept in the bay to perform the measurements that were performed by only one technician. Most farms created horses by extensive method, so all had access to *ad libitum* water and native pasture (mainly *Urochloa* spp). Animals were weaned at approximately seven to eight months of age, and they remained in the field until 2.5 to 3 years.

2.2 Data Collection

2.2.1 Testicular Biometry

To perform testicular measurements, the inherent temperament of the animal was considered, in addition to conditioning management to manipulation. Therefore, most of the animals were docile and easy to manipulate, so they were only manually contained using halter, so as to cause as little discomfort as possible. In some animals it was necessary to bend one of the thoracic limbs; a position similar to that used for trimming and shoeing methods.

With the caliper, the following measurements were collected:

- Right and left testicular length (RTL/LTL): evaluation performed between head insertion and epididymis cauda insertion (craniocaudal evaluation).
- Right and left testicular width (RTW/LTW): larger lateral diameter of each testis (lateromedial evaluation).
- Right and left testicular height (RTH/LTH): evaluation between the epididymis corpus and its contralateral end in the region of greater diameter (dorsoventral evaluation).
- Total scrotal width (TSW): evaluation of the largest laterolateral scrotal diameter, covering the two testes positioned ventrally in the scrotum.

The epididymis was disregarded in all measurements.

Other relevant characteristics were also evaluated, such as testicular consistency, testicular mobility and absence of fluid in the scrotum. Testicular consistency was classified as normal and abnormal; abnormal consistency (flaccid or rigid) may be associated with insufficient sperm production (PICKETT et al., 1987; PICKETT, 1993).

From measurements of length, width and height, we estimated the testicular volume of each testis using the equation proposed by Love et al. (1990), based on the calculation of the volume of the ellipsoid:

$$\text{Testicular Volume (TV cm}^3\text{)} = \frac{\pi (L \cdot W \cdot H)}{6}$$

Where, L = length (cm); W = width (cm); and H = height (cm).

The volume of both testes was used in analyses.

2.2.2 Body Morphometric

The thoracic perimeter was obtained with the aid of commercial tapes (Ruralban®) developed specifically for horses. The thoracic perimeter of the horse was measured by passing a tape through the place with the largest diameter, that is, on the highest part of the withers and the external region, just behind the thoracic limbs. After adjustment in the horse chest, it is possible to visualize the measurement in cm (left side) and the corresponding body weight (BW), in kg (right side).

To measure one of the vertical distances of the horse, the wither height (WH) was performed with the aid of the hypometer, according to that described by Godoi et al. (2012).

This was positioned on the left side of the animal, resting on a flat surface at the base and, the movable branch, positioned on the withers of the animal.

Wither is the zootechnical name for the bulge formed by the thoracic vertebrae, so it is the highest point of the animal chest. It is located immediately above the spinous processes of the 5th and 6th thoracic vertebra. When observing a horse sideways, it is aligned with the thoracic limbs.

2.3 Statistical Analysis

2.3.1 Nonlinear Models

Ten nonlinear models (Table 2) were evaluated. The cross-sectional analysis method was adopted, that is, elaboration of growth curves from measures taken once from a sample of Mangalarga Marchador stallions.

Table 2 – Nonlinear models used to describe the growth of TSW, TV, BW and WH in stallions of the Mangalarga Marchador breed.

Model	Equation	References
Brody	$y_t = \beta_1(1 - \beta_2 e^{(-\beta_3 t)}) + e_i$	Brody, 1945
Gompertz	$y_t = \beta_1 e^{(-\beta_2 e^{(-\beta_3 t)})} + e_i$	Gompertz, 1825
Hill	$y_t = \frac{\beta_1 t^{\beta_3}}{\beta_2 \beta_3 + t^{\beta_3}} + e_i$	Hill, 1910
Logistic I	$y_t = \frac{\beta_1}{1 + \beta_2 e^{(-\beta_3 t)}} + e_i$	Loaiza-Echeverri et al. 2013
Logistic II	$y_t = \frac{\beta_1}{1 + e^{(\beta_2 - \beta_3 t)}} + e_i$	Richards, 1959
Meloun I	$y_t = \beta_1 - \beta_2 e^{(-\beta_3 t)} + e_i$	Meloun et al. 1996
Meloun II	$y_t = \beta_1 - e^{(-\beta_2 - \beta_3 t_i)} + e_i$	Souza et al. 2013
Michaelis-Menten	$y_t = \frac{\beta_1 t}{t + \beta_2} + e_i$	Michaelis e Menten, 1913
Mitscherlich	$y_t = \beta_1(1 - e^{(\beta_1 \beta_2 - \beta_3 t_i)}) + e_i$	Souza et al. 2013
Von Bertalanffy	$y_t = \beta_1(1 - \beta_2 e^{(-\beta_3 t)})^3 + e_i$	Von Bertalanffy, 1957

The table elements above are: y_t = variable analyzed, TSW (total scrotal width), TV (testicular volume), BW (body weight) and WH (withers height); β_1 = asymptote, that is, the estimated value of the variable at maturity; β_2 = integration constant to model the sigmoid curve, but without biological interpretation, except for the Michaelis-Menten model, because this parameter represents the age at which $y_t = \beta_1 / 2$; β_3 = maturity index, therefore, establishes the precocity with which the variable reaches the asymptote; and e_i is the experimental error associated with the variable, assumed to be random, independent and with normal distribution $N(0, \sigma^2)$.

The parameters of the growth curve of TSW, TV, BW and WH (β_1 , β_2 and β_3) were estimated by the Proc MODEL of the Statistical Analysis System (SAS, 2002). The iterative process used was Gauss-Newton. For these analyses, the age of the animals was considered in days, considering the date of birth until the date of collection. The animals were identified in the properties for subsequent confirmation of age in the database of genealogical records of ABCCMM.

From the values found for the β_1 , β_2 and β_3 parameters, the inflection point (IP) was calculated, in addition to the age (in days) that the variable reached IP. Therefore, the IP is the moment evidenced by the highest growth speed. The IP and age at the IP for the Gompertz, Hill, Logistic I and II and von Bertalanffy models were calculated as shown in Table 3.

Table 3 – Inflection points (IP) and age at IP of the nonlinear models used to describe TSW, TV, BW and WH growth curves in Mangalarga Marchador stallions.

Model	Inflection Point (IP)	Age at IP	References
Gompertz	$0.368\hat{\beta}_1$	$\frac{\ln\left(\frac{\ln(0.368)}{-\hat{\beta}_2}\right)}{-\hat{\beta}_3}$	Nieto et al., 2006
Hill	$\frac{\hat{\beta}_1\left(\frac{\hat{\beta}_3 - 1}{\hat{\beta}_2^{-\hat{\beta}_3}(\hat{\beta}_3 + 1)}\right)}{\hat{\beta}_2^{\hat{\beta}_3} + \left(\frac{\hat{\beta}_3 - 1}{\hat{\beta}_2^{-\hat{\beta}_3}(\hat{\beta}_3 + 1)}\right)}$	$\left(\frac{\hat{\beta}_3 - 1}{\hat{\beta}_2^{-\hat{\beta}_3}(\hat{\beta}_3 + 1)}\right)^{\frac{1}{\hat{\beta}_3}}$	Goutelle et al., 2008
Logistic I	$\frac{\hat{\beta}_1}{2}$	$\frac{\ln(\hat{\beta}_2)}{\hat{\beta}_3}$	Notter et al., 1985

Logistic II	$\frac{\hat{\beta}_1}{2}$	$\frac{-\hat{\beta}_2}{-\hat{\beta}_3}$	Richards, 1959
Von Bertalanffy	$0.2963\hat{\beta}_1$	$\frac{\ln\left(\frac{0.2963^{\frac{1}{3}} - 1}{-\hat{\beta}_2}\right)}{-\hat{\beta}_3}$	Nieto et al., 2006

$\hat{\beta}_1$, $\hat{\beta}_2$ and $\hat{\beta}_3$ are the parameters estimated by nonlinear models. $\hat{\beta}_1$ = asymptote (estimated value of the variable at maturity); $\hat{\beta}_2$ = integration constant; $\hat{\beta}_3$ = maturity index.

2.3.2 Goodness of Fit

Goodness of fit for all models was evaluated according to the following criteria:

The corrected Akaike information criterion (AICc), proposed by Bozdogan (1987), is calculated by the following formula:

$$AICc = -2 \loglike + 2pn/(n-p-1)$$

Where, loglike the logarithm of maximum likelihood, considering parameter estimates; p, the number of parameters adjusted independently within the model; and n, the number of observations. Lower AIC values reflect better model adjustment (AKAIKE, 1974).

In turn, the Bayesian information criterion (BIC), proposed by Schwarz (1978), is given by:

$$BIC = -2 \loglike + p \ln n$$

Where n is the number of observations used to adjust the curve; and ln = natural logarithm. Lower BIC values also reflect a better model adjustment (SCHWARZ, 1978).

The adjusted R^2 , responsible for determining the percentage of variation in the measures explained by the statistical model, is calculated as:

$$R^2_{adj} = R^2 - \left(\frac{p-1}{n-p}\right) \times (1-R^2)$$

R^2_{adj} is the coefficient of determination adjusted; R^2 is the square of the correlation coefficient between observed and predicted values; p is the number of parameters of the model; and n is the number of observations.

The error sum of squares (ESS) considers that the deviation of a Y_i observation was calculated from its own estimated mean. Therefore, ESS is pointed out as an accepted fitting control (LOAIZA-ECHEVERRI et al., 2013). It is calculated using the following formula:

$$ESS = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2 / N$$

According to Loaiza-Echeverri et al. (2013), the mean absolute deviation (MAD) of a dataset is the average relative disagreement between observed and predicted values. It gives us an idea about the variability in a dataset. This measure can be defined by the equation, where the lower the value, the better the adjustment:

$$MAD = \sum [Y_i - \hat{Y}_i] / N$$

The average prediction error (APE) quantifies the relative distance between the observed and predicted values, providing an indication of the average error size. Thus, its ideal value would be equal to zero. It can be calculated using the following equation:

$$APE = \sum [(Y_i - \hat{Y}_i) / Y_i] * 100 / N$$

In ESS, MAD and APE, Y_i = value observed; \hat{Y}_i = value estimated by the model; and N = number of observations.

2.3.3 Absolute Growth Rate (AGR)

After defining which model best adjusted to the collected data set in relation to biometric and morphometric variables (TSW, TV, WH and BW), the growth curve was configured and presented in graphs.

After this step, other parameters were calculated, such as age at puberty (coincident with IP), measurement to sexual maturity (asymptote or $\hat{\beta}_1$) and absolute growth rate (AGR), which corresponds to the increase in the value of the variable for each unit time (t). The AGR calculation is based on the derivative of the selected model (y) in relation to time (t).

$$\frac{\partial y}{\partial t}$$

2.3.4 Phenotypic Correlations

The Pearson coefficient test was used by the statistical program SAS (2002) to analyze the correlations, where $p < 0.05$ represents a statistically significant difference. The classification of correlations followed the scale of the Dancey and Reidy (2006), where $r = 0.10$ to 0.30 (weak); $r = 0.31$ to 0.69 (moderate); $r = 0.70$ to 1.0 (strong).

In order to evaluate the differences between the general means of the variables obtained, the Tukey test (ANOVA) was performed, where $p < 0.05$ represents a statistically significant difference. In addition, the animals were divided into three age groups (GI, GII and GIII), which were also submitted to the Tukey test (ANOVA) in order to evaluate the differences between the means of each age group. Differences between sides (left and right) by paired t Test.

3 RESULTS

Table 4 shows the overall average, standard deviation and amplitude regarding the results found for the biometric and morphometric traits evaluated in Mangalarga Marchador stallions.

Table 4 - Descriptive statistics of testicular biometry and body morphometry of Mangalarga Marchador stallions

Variable	Mean	Std. Dev.	Minimum	Maximum
BW (kg)	418.42	44.87	310	520
TC (cm)	175.54	7.06	158	191
WH (cm)	147.92	3.81	139	157
TSW (cm)	9.80	1.28	6.60	12.20
TW (cm)	4.65	0.62	3.10	6.10
RTW (cm)	4.56	0.69	2.60	6.40
LTW (cm)	4.74	0.66	2.10	6.30
TL (cm)	9.01	0.99	5.80	11.25
RTL (cm)	8.95	1.21	5.00	11.50
LTL (cm)	9.06	0.96	5.70	11.40
TH (cm)	5.43	0.79	3.30	7.50
RTH (cm)	5.39	0.87	3.00	7.70
LTH (cm)	5.47	0.80	3.40	7.60
TV (cm³)	240.07	79.84	67.17	440.44
RTV (cm³)	116.36	42.96	22.02	230.86
LTV (cm³)	123.70	41.15	36.53	225.63

BW = Body Weight; TC = Thoracic Circumference; WH = Wither Height; TSW = Total Scrotal Width; TW = Testicular Width; RTW and LTW = Right and Left Testicular Width; TL = Testicular Length; RTL and LTL = Right and Left Testicular Length; TH = Testicular Height; RTH and LTH = Right and Left Testicular Height; TV = Testicular Volume; RTV and LTV = Right and Left Testicular Volume

Table 5 shows the values of the mean and standard deviation found for biometric traits and morphometric characteristics evaluated (according to each age group). For the analysis of body morphometry, all variables, when compared by the Tukey test, showed statistical difference ($p < 0.05$) among groups. In relation to biometric analysis, the comparison among all

variables by the Tukey test, showed statistical difference ($p < 0.05$) of GI in relation to GII and GIII. However, groups II and III showed no statistical difference ($p > 0.05$).

Table 5 - Mean \pm SE values of the testicular biometry and body morphometry of Mangalarga Marchador stallions

Group of Age	BW	TC	WH	TSW	TW	TL	TH	Volume
GI	392.80 \pm 44.61 ^a	171.61 \pm 7.28 ^a	145.5 \pm 4.15 ^a	8.80 \pm 1.38 ^a	4.22 \pm 0.62 ^a	8.40 \pm 1.22 ^a	4.83 \pm 0.75 ^a	182.41 \pm 77.04 ^b
GII	418.51 \pm 41.07 ^b	175.44 \pm 6.35 ^b	148.47 \pm 3.40 ^b	10.06 \pm 1.01 ^b	4.74 \pm 0.57 ^b	9.30 \pm 0.84 ^b	5.46 \pm 0.73 ^b	252.65 \pm 74.46 ^a
GIII	439.79 \pm 37.53 ^c	178.93 \pm 5.80 ^c	149.39 \pm 2.89 ^b	10.40 \pm 0.88 ^b	4.92 \pm 0.46 ^b	9.24 \pm 0.66 ^b	5.84 \pm 0.58 ^b	276.33 \pm 59.03 ^a

Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at $p < 0.05$.

BW = Body Weight; TC = Thoracic Circumference; WH = Withers Height; TSW = Total Scrotal Width; TW = Testicular Width; TL = Testicular Length; TH = Testicular Height; TV = Testicular Volume.

In the table 6, there are the values of the mean and standard deviation found for the evaluated biometric traits according to each age group. All variables, when compared by the Tukey test, showed statistical difference ($p < 0.05$) of GI in relation to GII and GIII. However, groups II and III showed no statistical difference ($p > 0.05$). In addition, the variables were submitted to the T-test in order to attest to the difference between the left and right testicles. For width, it is observed that there is statistical difference ($p < 0.05$) in GI and GII. For length and volume, the difference is present only in GI.

Table 6 - Mean \pm SE values of the testicular biometry evaluated of Mangalarga Marchador stallions

Group of Age	RTW	LTW	RTL	LTL	RTH	LTH	RTV	LTV
GI	4.09 \pm 0.78 ^{aA}	4.35 \pm 0.60 ^{aB}	8.23 \pm 1.44 ^{aA}	8.59 \pm 1.14 ^{aB}	4.78 \pm 0.86 ^{aA}	4.89 \pm 0.70 ^{aA}	86.09 \pm 44.46 ^{aA}	182.41 \pm 77.04 ^{aB}
GII	4.65 \pm 0.62 ^{bA}	4.82 \pm 0.60 ^{bB}	9.36 \pm 0.95 ^{bA}	9.23 \pm 0.86 ^{bA}	5.46 \pm 0.81 ^{bA}	5.46 \pm 0.75 ^{bA}	124.37 \pm 38.54 ^{bA}	128.29 \pm 40.26 ^{bA}
GIII	4.85 \pm 0.44 ^{bA}	4.99 \pm 0.63 ^{bA}	9.16 \pm 0.97 ^{bA}	9.31 \pm 0.74 ^{bA}	5.78 \pm 0.69 ^{bA}	5.90 \pm 0.66 ^{cA}	134.07 \pm 31.58 ^{bA}	142.27 \pm 34.06 ^{bA}

Different lowercase letters in the same column and uppercase letters in the same row (only for each pair of characteristics = right and left) indicate significant difference at $p < 0.05$.

RTW and LTW = Right and Left Testicular Width; RTL and LTL = Right and Left Testicular Length; RTH and LTH = Right and Left Testicular Height; RTV and LTV = Right and Left Testicular Volume

In Table 7, phenotypic correlations are presented between the different testicular biometric and morphometric traits of Mangalarga Marchador stallions. The correlations between weight and all other parameters are moderate and favorable. However, all biometric measurements correlated with age in a weak to moderate. It is possible to observe the moderate and favorable correlation between all morphometric characteristics and TSW.

Moreover, most testicular biometric traits correlate each other moderately and favorable, save some exceptions: high and favorable correlation between TSW and TL ($r = 0.91$); high and favorable correlation also between TSW and TV ($r = 0.85$).

Table 7 - Pearson Correlation Coefficients on the mean of testicular biometry and body morphometric characteristics evaluated of Mangalarga Marchador stallions

	Age	BW	TC	WH	TSW	TW	TL	TH	Volume
Age	1								
BW	0.43 **	1							
TC	0.42 **	0.99 **	1						
WH	0.36 **	0.63 **	0.61 **	1					
TSW	0.36 **	0.52 **	0.51 **	0.51 **	1				
TW	0.35 **	0.49 **	0.48 **	0.50 **	0.91 **	1			
TL	0.24 **	0.42 **	0.42 **	0.44 **	0.68 **	0.70 **	1		
TH	0.45 **	0.49 **	0.48 **	0.48 **	0.71 **	0.70 **	0.70 **	1	
TV	0.39 **	0.54 **	0.53 **	0.53 **	0.85 **	0.89 **	0.84 **	0.91 **	1

BW = Body Weight; TC = Thoracic Circumference; WH = Wither Height; TSW = Total Scrotal Width; TW = Testicular Width; TL = Testicular Length; TW/TL = Testicular Width and Length Ratio; TH = Testicular Height; TV = Testicular Volume. ** $p < 0.01$

The data collected regarding the total scrotal width (TSW) are shown in Fig 1. The TSW measurements ranged from 6.6 cm to 12.2 cm, with average equal to 9.8 cm.

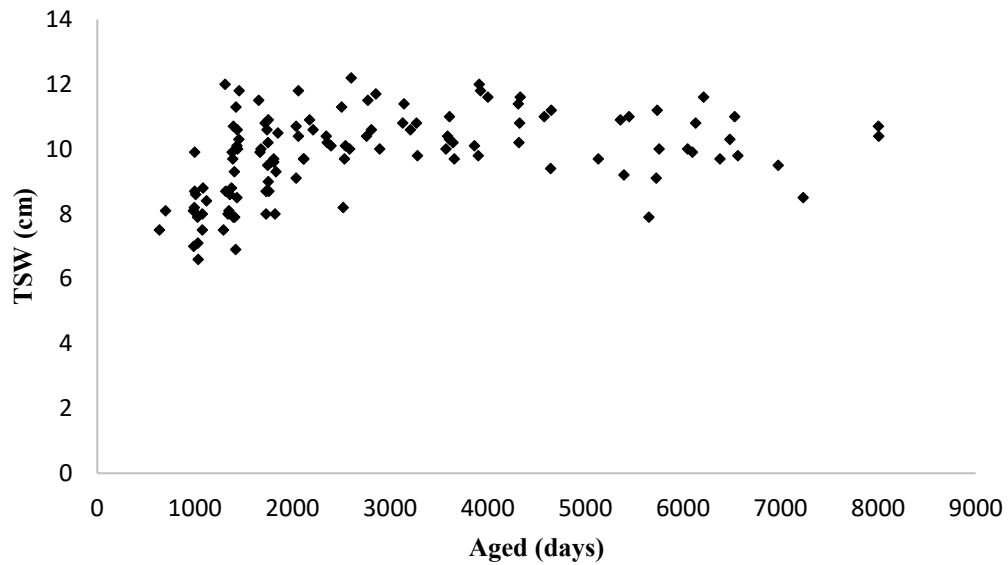


Fig. 1: Observed Total Scrotal Width (TSW) of Mangalarga Marchador stallions from 638 to 8006 days of age.

Table 8 shows the parameters of the growth curves and their respective standard error. Regarding parameter estimates, Michaelis-Menten and Hill presented the highest asymptotic values ($\hat{\beta}_1$), while Logistic I and II models presented the lowest, and the last two presented reliable estimates about the inflection point (table 9). Logistic I and II and Gompertz presented similar values for asymptote. For the Michaelis-Menten model, the $\hat{\beta}_2$ value was 297.8147, very close to the inflection point value of the Logistic I and II model, 277.89 and 279.69 (table 9). The Hill model presented the highest $\hat{\beta}_3$ value, which allowed the calculation of the inflection point, once it is only possible to calculate it when $\hat{\beta}_3$ is greater than 1 (GOUTELLE et al. 2008). The Brody model estimated the lowest value for the maturity index when compared to the other models.

The estimated inflection point (IP) and age at IP showed high variability among models. The inflection point is evidenced by the high growth rate and is related to the process of puberty of the animal (NOTTER et al., 1985; NIETO et al. 2006; LOAIZA-ECHEVERRI et al., 2013). In this study, age and IP widely varied among models (63.44 days to 291.23 days). Von Bertalanffy model estimated the IP at a very early age, while the Hill model had the highest age value of IP. Logistic I and II models, in addition to presenting identical values for IP (5.23 cm), estimated a very similar IP age (277.89 and 279.69 days). The Gompertz model, in this regard, had very different results from the Logistic I and II models.

Table 8 - Parameter estimates (\pm SE) for nonlinear models used to describe Total Scrotal Width (TSW) of Mangalarga Marchador stallions.

Model	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$
Brody	10.48255 \pm 0.1585	0.903135 \pm 0.3094	0.001468 \pm 0.000335
Gompertz	10.47238 \pm 0.1540	1.222274 \pm 0.4812	0.001641 \pm 0.000371
Hill	10.60811 \pm 0.2288	512.7107 \pm 82.5627	1.973821 \pm 0.4818
Logistic I	10.46486 \pm 0.1507	1.654105 \pm 0.7385	0.001811 \pm 0.000408
Logistic II	10.46385 \pm 0.1505	0.507645 \pm 0.4470	0.001815 \pm 0.000409
Meloun I	10.48239 \pm 0.1585	9.472019 \pm 3.1871	0.001469 \pm 0.000335
Meloun II	10.48123 \pm 0.1583	-2.25206 \pm 0.3368	0.001473 \pm 0.000336
Michaelis-Menten	11.21087 \pm 0.2454	297.8147 \pm 49.8075	-
Mitscherlich	10.48162 \pm 0.1584	-67.1316 \pm 247.5	0.001471 \pm 0.000335
Von Bertalanffy	10.47521 \pm 0.1554	0.368589 \pm 0.1388	0.001585 \pm 0.000359

$\hat{\beta}_1$ = asymptote (estimated value of the variable at maturity); $\hat{\beta}_2$ = integration constant. For the Michaelis-Menten model, $\hat{\beta}_2$ is the age that the value of the variable is exactly half of the asymptote ($\hat{\beta}_1$); $\hat{\beta}_3$ = maturity index.

Table 9 - Inflection points (IP) and age at IP estimated by the Gompertz, Hill, Logistic I and II, and von Bertalanffy models used to describe the growth curve of Total Scrotal Width (TSW) of Mangalarga Marchador stallions.

Model	IP (cm)	Age at IP (days)
Gompertz	3.85	121.67
Hill	2.62	291.23
Logistic I	5.23	277.89
Logistic II	5.23	279.69
von Bertalanffy	3.10	63.44

The goodness of fit for all models is shown in Table 10. Logistic I and II models showed the lowest values for the AICc and BIC, indicating a better fitting. The Gompertz model has the closest values of the Logistic models for both AICc and BIC. Adjusted R² values differed

greatly among models (0.3065 to 0.3613), with Logistic I and II showing the highest values, followed by the Gompertz model. For ESS, Logistic I and II models presented the lowest values, followed by Gompertz. In relation to MAD, Logistic I exhibited the lowest value; Logistic II and Gompertz models consecutively. The Logistic II model has the value of APE closest to 0, followed by Logistic I model (table 10).

Table 10 - Goodness of fit for nonlinear models used to describe Total Scrotal Width (TSW) of Mangalarga Marchador stallions.

Model	AICc	BIC	Adj. R²	ESS	MAD	APE
Brody	350.038697	350.069344	0.3553	1.027766	0.812711	-1.13298
Gompertz	349.402697	349.433344	0.3587	1.022333	0.809973	-1.12046
Hill	353.549297	353.579944	0.3361	1.058279	0.825946	-1.14807
Logistic I	348.905297	348.935944	0.3613	1.018104	0.807735	-1.11522
Logistic II	348.905297	348.935944	0.3613	1.018104	0.807739	-1.11152
Meloun I	350.038697	350.069344	0.3553	1.027766	0.812734	-1.13762
Meloun II	350.038697	350.069344	0.3553	1.027767	0.812767	-1.13784
Michaelis-Menten	357.700164	357.755962	0.3065	1.114905	0.836525	-1.27439
Mitscherlich	350.038697	350.069344	0.3553	1.027766	0.812727	-1.13055
Von Bertalanffy	349.598297	349.628944	0.3576	1.024003	0.827655	-1.12928

AICc = Corrected Akaike's Information Criterion; BIC = Bayesian Information Criterion; Adj. R² = Adjusted R²; ESS = Error Sum of Square; MAD = Mean Absolute Deviation; APE = Average Prediction Error.

Based on the goodness of fit, the Logistic I model was selected to describe the TSW growth curve (Fig. 2), in addition to estimating the value of AGR (Fig. 3).

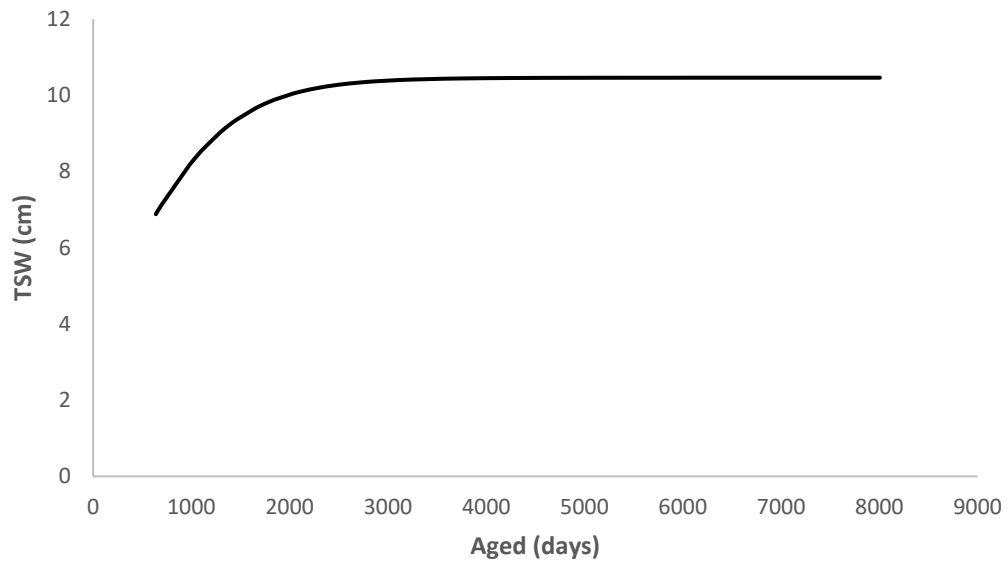


Fig. 2: Total Scrotal Width (TSW) estimated by Logistic I model in Mangalarga Marchador stallions.

The selected animals are older than the point of higher growth rate in relation to the total scrotal width, therefore, it is not demonstrated in the graph (Fig. 3). It is observed that the period between 638 and 2000 days, the total scrotal width increased by 0.00231 cm per day; between 2001 and 3000 days, growth was 0.00037 cm per day; and finally, between 3001 and 8006 days, the increase is 0.000015 cm per day.

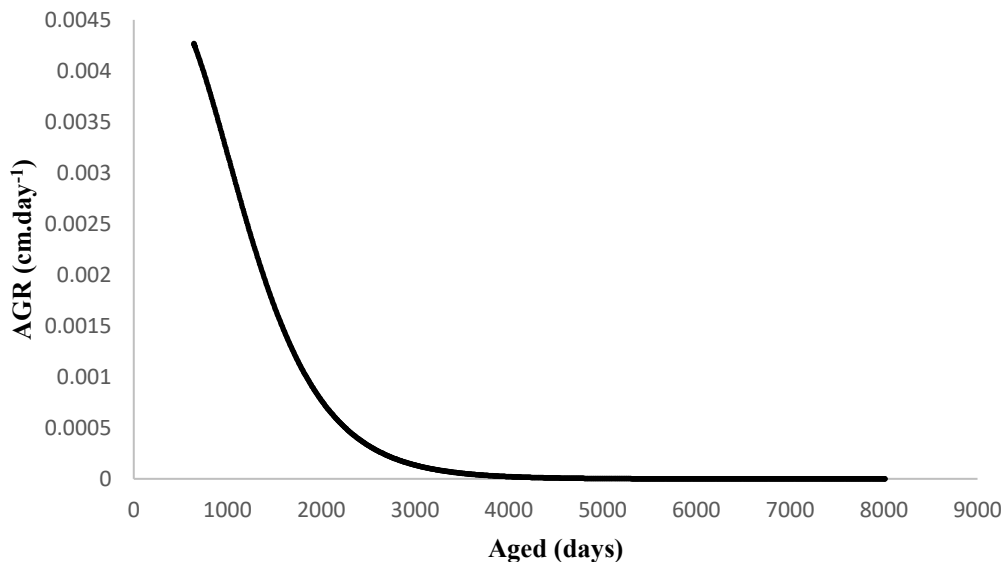


Fig. 3: Absolute Growth Rate (AGR) estimated by Logistic I model in Mangalarga Marchador stallions.

Regarding Testicular Volume, the collected data are shown in Figure 4. TV measurements ranged from 67.17 cm³ to 440.44 cm³, with average equal to 240.07 cm³.

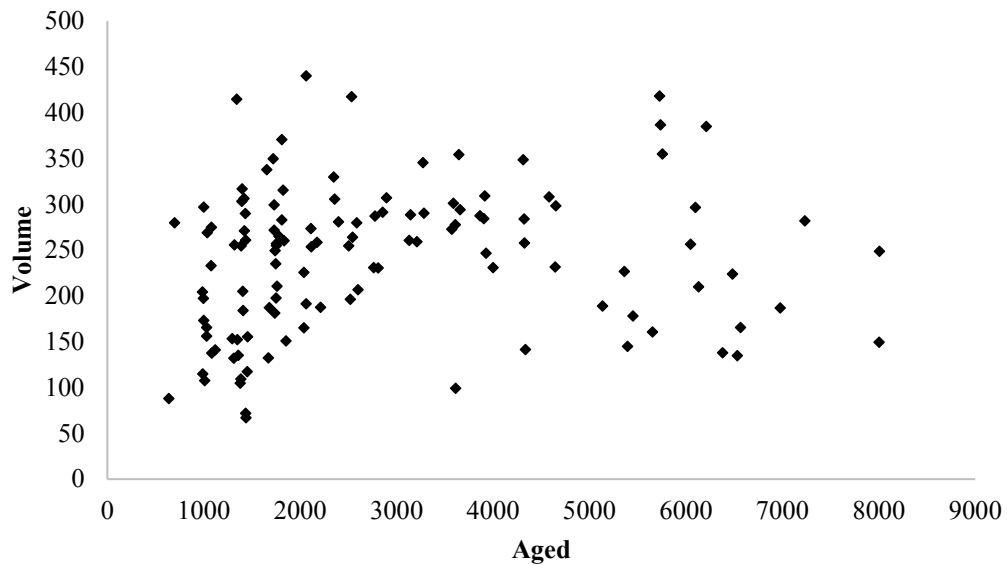


Fig. 4: Observed Testicular Volume (TV) of Mangalarga Marchador stallions from 638 to 8006 days of age.

Logistic I and II and Gompertz presented similar values for asymptote (table 11). Moreover, the Michaelis-Menten, Meloun II and Mitscherlich models presented the highest asymptotic values, while Logistic I and II models presented the lowest (table 11). For the Michaelis-Menten model, the $\hat{\beta}_2$ value was 855.8652, far from the inflection point value of the Logistic I and II models, 939.32 and 939.51 (table 12). Regarding the maturity index ($\hat{\beta}_3$), the Logistics I and II models are right after the Hill model; the values are 0.002176 and 0.002177, respectively. The estimated inflection point (IP) and age at IP showed high variability among models (table 12).

Table 11 - Parameter estimates for nonlinear models used to describe Total Volume (TV) of Mangalarga Marchador stallions.

Model	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$
Brody	281.8382 ± 10.9801	1.625667 ± 0.6230	0.001294 ± 0.000358
Gompertz	279.9971 ± 10.1026	3.542254 ± 1.9573	0.001739 ± 0.000475
Hill	283.963 ± 12.6363	970.0809 ± 83.4210	2.743131 ± 0.7671
Logistic I	278.7374 ± 9.6379	7.721113 ± 5.6335	0.002176 ± 0.000595
Logistic II	278.724 ± 9.6361	2.045306 ± 0.7299	0.002177 ± 0.000595
Meloun I	281.86 ± 10.9846	457.7197 ± 167.6	0.001293 ± 0.000358
Meloun II	281.914 ± 10.9960	-6.12366 ± 0.3659	0.00129 ± 0.000358
Michaelis-Menten	334.4492 ± 21.7143	855.8652 ± 207.0	-
Mitscherlich	281.8812 ± 10.9892	374.9735 ± 200.4	0.001292 ± 0.000358
Von Bertalanffy	280.5592 ± 10.3369	0.907366 ± 0.4486	0.001588 ± 0.000435

$\hat{\beta}_1$, $\hat{\beta}_2$ and $\hat{\beta}_3$ are the parameters estimated by nonlinear models. $\hat{\beta}_1$ = asymptote (estimated value of the variable at maturity); $\hat{\beta}_2$ = integration constant; $\hat{\beta}_3$ = maturity index.

Table 12 - Inflection points (IP) and age at IP estimated by the Gompertz, Hill, Logistic I and II, and von Bertalanffy models used to describe the growth curve of Testicular Volume (TV) of Mangalarga Marchador stallions.

Model	IP (cm ³)	Age at IP (days)
Gompertz	103.04	727.48
Hill	90.22	734.20
Logistic I	139.36	939.32
Logistic II	139.36	939.51
von Bertalanffy	83.13	630.61

The goodness of fit for all models is shown in Table 13. The results are very similar to the results presented for TSW growth curve. Logistic I and II models showed the lowest values for the AICc and the BIC, indicating a better fitting. The Gompertz model has the closest values to Logistic models for both AICc and BIC. The adjusted R² values did not differ much among

all models. Logistic I and II models presented the highest value, and then the Gompertz model. For the sum of the squares of errors (ESS), Logistic I and II models presented the lowest values, followed again by Gompertz. Regarding MAD, Von Bertalanffy exhibited the lowest value; successively, the Logistic I and II models. The Logistic II model has the value of APE closest to 0; in sequence, the values for the Logistic I and Gompertz models are soon (table 13).

Table 13 - Goodness of fit for nonlinear models used to describe Testicular Volume (TV) of Mangalarga Marchador stallions.

Model	AICC	BIC	Adj. R²	ESS	MAD	APE
Brody	1353.2489	1353.28	0.2934	602053	60.9122	-12.0314
Gompertz	1351.8729	1351.90	0.3015	6010.74	60.7067	-11.82
Hill	1353.3137	1353.34	0.293	6115.55	61.3695	-11.7127
Logistic I	1351.2165	1351.25	0.3053	5981.01	60.6620	-11.7695
Logistic II	1351.2169	1351.25	0.3053	5981.16	60.6626	-11.7644
Meloun I	1353.2497	1353.28	0.2934	6020.60	60.9118	-12.0339
Meloun II	1353.2489	1353.28	0.2934	6021.46	60.9145	-12.0267
Michaelis-Menten	1358.6545	1358.71	0.2541	6188.12	63.2548	-13.1591
Mitscherlich	1353.2489	1353.28	0.2934	6021.80	60.9167	-12.0199
Von Bertalanffy	1352.2389	1352.27	0.2993	6018.06	57.2891	-11.8547

AICc = Information Criteria Corrected Akaike's; BIC = Bayesian Information Criteria; Adj. R² = Adjusted R²; ESS = Error Sum of Square; MAD = Mean Absolute Deviation; APE = Average Prediction Error.

Based on the values of the parameters and the goodness of fit, Logistic II model was selected to describe the TV growth curve (Fig. 5); in addition to estimating the value of AGR (Fig. 6).

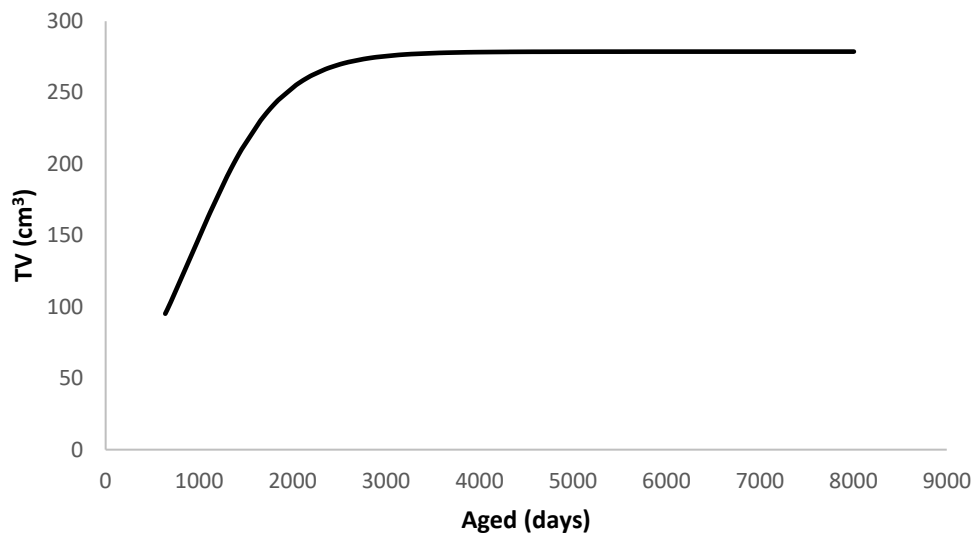


Fig. 5: Testicular Volume (TV) estimated by Logistic II model in Mangalarga Marchador stallions.

It is possible to observe the point of higher speed of growth of the testicular volume occurred at 638 and 940 days, the testicular volume increased by 0.146483 cm per day, until it reaches the highest growing point at 940 days; between 941 and 2000 days, growth was 0.107589 cm per day; between 2001 and 3000 days, the increase is 0.022064 cm per day; and finally, between 3001 and 8006 days, the increase is 0.0006192 cm per day.

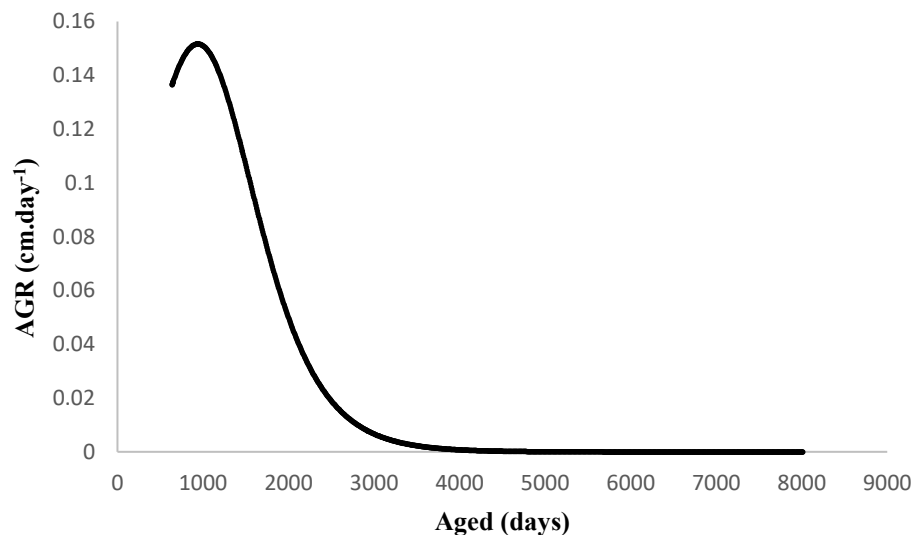


Fig. 6: Absolute Growth Rate (AGR) estimated by Logistic II model in Mangalarga Marchador stallions.

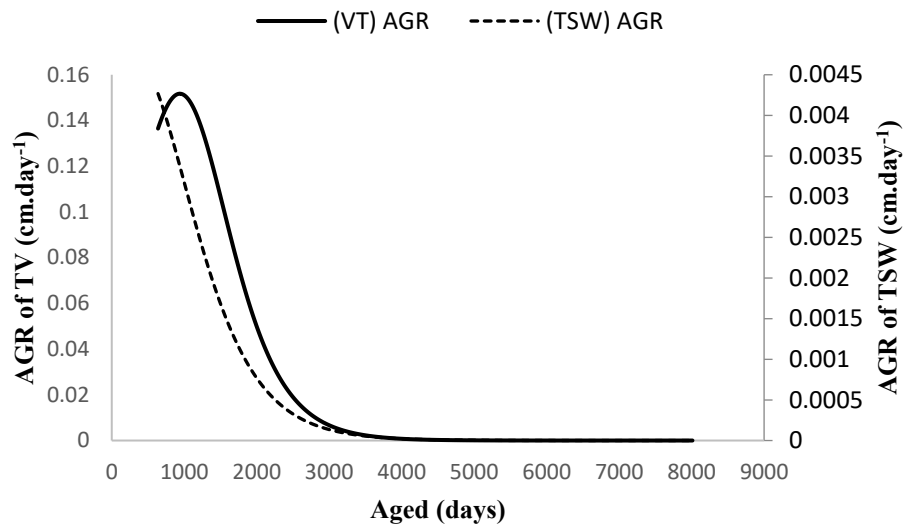


Fig. 7: Absolute Growth Rate (AGR) estimated by Logistic I (TSW) and Logistic II (TV) model in Mangalarga Marchador stallions.

In order to identify which of the three biometric measurements (width, length and height) most influenced the prolonged period of testicular volume growth, the Logistic II model was used to elaborate the growth curve of each of the measurements (fig. 8). The upper curve refers to testicular length (TL), the greatest measurement of the testicle. The middle curve belongs to testicular height (TH) and is very close to the lower curve, related to testicular width (TW), as both usually have similar values. Subsequently, analyzing the graph (fig. 8), it is possible to observe that there is a subtle difference in the moment when each begins to form the plateau of the growth curve: close to 1500 days, it is noted that the curve referring to The TW is closer to the plateau in relation to TL and TH curves; and at 2000 days, it is noted that the curves related to TL and TW have already reached the plateau, while TH still shows growth. Table 14 presents the parameters ($\hat{\beta}_1$, $\hat{\beta}_2$ and $\hat{\beta}_3$) calculated by Logistic II model. It is observed that TL has the highest maturity index ($\hat{\beta}_3$), therefore, it is the measure that reaches maturity more quickly; while TH has the lowest index ($\hat{\beta}_3$). The wide variation in age that the three measures reach IP demonstrates how long the process is for each of them and, consequently, how long the testicular development process of horses is. Table 15, in turn, presents the results found for IP and age at IP through the Logistic II model. There is a wide variation in age that the three measurements reach IP (18.63 days to 174.13 days). Finally, analyzing the graph for the growth rates of each of the curves (fig. 9), it is possible to conclude that testicular height (TH) is the measure that remains with the highest

growth rate over time, therefore, it is the one that most influences the prolongation of the development of testicular volume.

Table 14 – Parameter estimates for Logistic II model used to describe testicular width (TW), testicular length (TL) and testicular height (TH) of Mangalarga Marchador stallions.

Trait	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$
TW	4.955899 ± 0.0780	0.291147 ± 0.4775	0.001672 ± 0.000434
TL	9.364976 ± 0.1285	0.035223 ± 0.6427	0.001891 ± 0.000619
TH	5.844754 ± 0.1131	0.173584 ± 0.4837	0.001443 ± 0.000424

$\hat{\beta}_1$ = asymptote (estimated value of the variable at maturity); $\hat{\beta}_2$ = integration constant; $\hat{\beta}_3$ = maturity index.
TW = Testicular Width; TL = Testicular Length; TH = Testicular Height

Table 15 - Inflection points (IP) and age at IP estimated by the Logistic II model used to describe the growth curve of testicular width (TW), testicular length (TL) and testicular height (TH) of Mangalarga Marchador stallions.

Trait	IP (cm)	Age at IP (days)
TW	2.477950	174.13
TL	4.682488	018.63
TH	2.922377	120.29

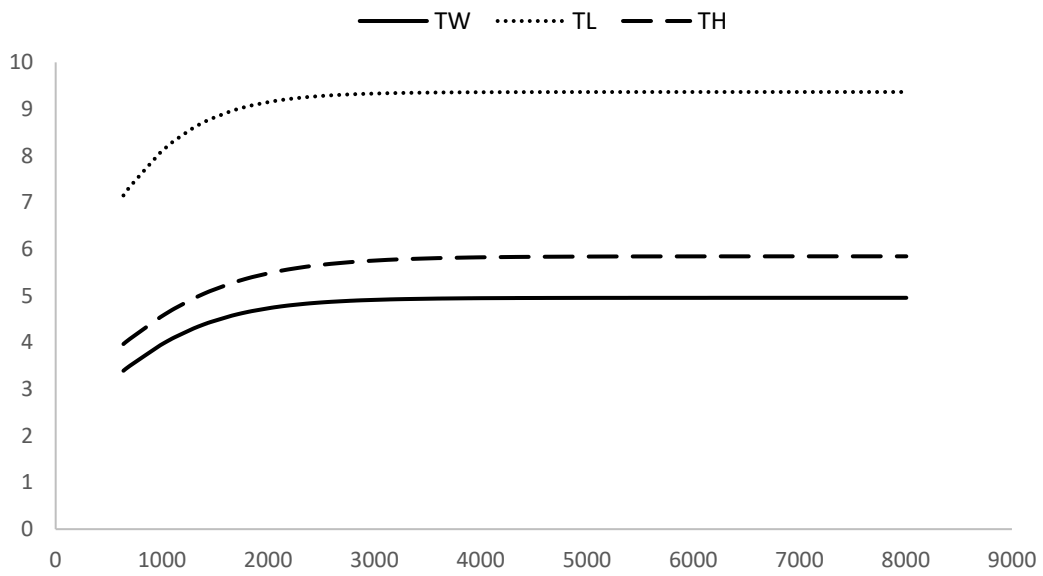


Fig. 8: Testicular width (TW), length (TL) and height (TH) estimated by Logistic II model in Mangalarga Marchador stallions.

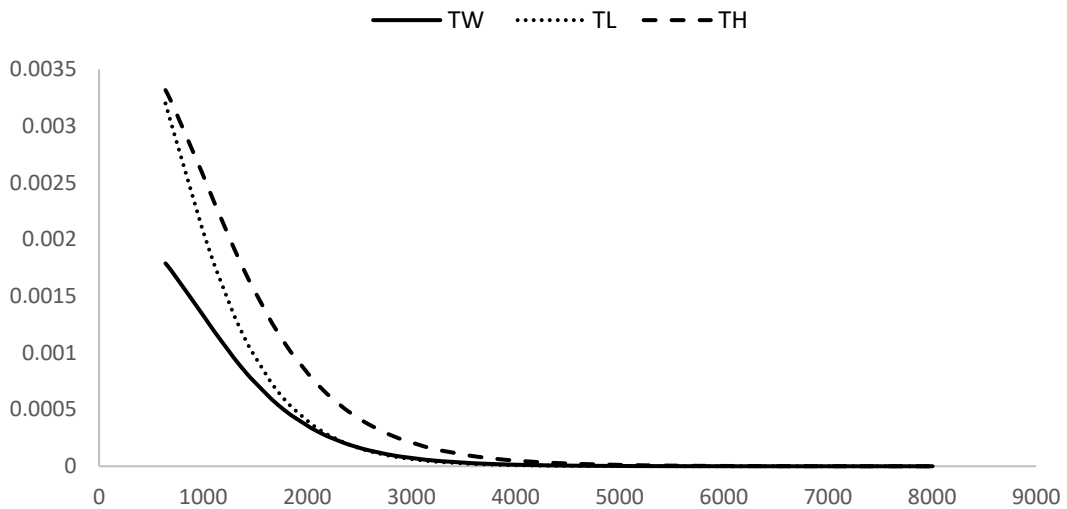


Fig. 9: Absolute Growth Rate (AGR) estimated by Logistic II model for TW, TL and TH in Mangalarga Marchador stallions.

The data collected regarding the body weight of Mangalarga Marchador stallions are shown in Fig 10. The Body Weight measurements ranged from 310 to 520 kg. The mean population of stallions evaluated equal to 418.42 kg.

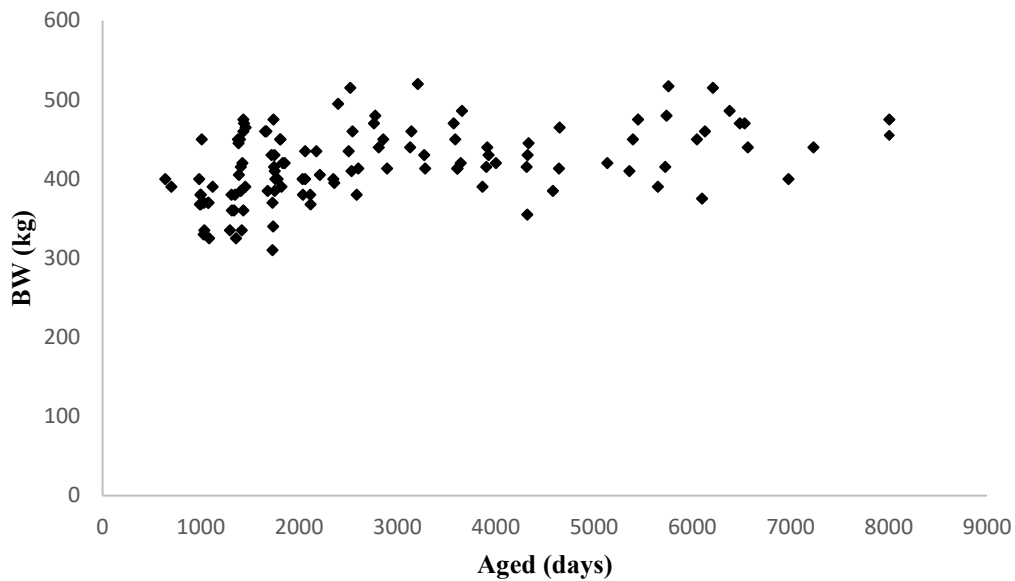


Fig. 10: Observed body weight of Mangalarga Marchador stallions from 638 to 8006 days of age.

Regarding parameter estimates, the models analyzed had similar values, with the exception of four models whose values represent the extremes. Hill and Michaelis-Menten and Hill presented the highest asymptotic values ($\widehat{\beta}_1$), while Logistic I and II models presented the lowest (table 16). Logistic I and II models presented similar values for asymptote: 444.658 and 444.6614 (table 16). For the Michaelis-Menten model, the $\widehat{\beta}_2$ value was 203.9, too far from the inflection point value of the Logistic I and II model, 1003.74 and 1004.03 (table 17). In sequence, are the Logistic I and II and Gompertz models, whose values of the maturity index ($\widehat{\beta}_3$) are 0.000904, 0.000904 and 0.000838 respectively. Although the Hill model presented the highest $\widehat{\beta}_3$ value, equal to 0.697922, not allowed the calculation of the inflection point (table 17), once it is only possible to calculate it when $\widehat{\beta}_3$ is greater than 1 (GOUTELLE et al. 2008). Therefore, he was disregarded from the analysis.

The estimated IP and age at IP showed a small variability between the Gompertz, Logistic I and II and von Bertalanffy models (table 17). None of models presented a reliable inflection point (IP), because they estimated negative values for age at IP.

Table 16 - Parameter estimates for nonlinear models used to describe Weight of Mangalarga Marchador stallions.

Model	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$
Brody	445.8171 ± 9.4349	0.307816 ± 0.1191	0.000775 ± 0.000357
Gompertz	445.2204 ± 8.7018	0.351359 ± 0.1316	0.000838 ± 0.000350
Hill	478.4369 ± 52.6311	133.68 ± 130.1	0.697922 ± 0.5637
Logistic I	444.658 ± 8.3541	0.403581 ± 0.1631	0.000904 ± 0.000367
Logistic II	444.6614 ± 8.3559	-0.90764 ± 0.4040	0.000904 ± 0.000367
Meloun I	445.8357 ± 9.1078	136.9039 ± 46.2325	0.000773 ± 0.000333
Meloun II	445.8174 ± 9.0895	-4.92167 ± 0.3380	0.000775 ± 0.000333
Michaelis-Menten	459.9254 ± 8.5864	203.9465 ± 39.4053	
Mitscherlich	445.8192 ± 9.0910	-1520.35 ± 1070.6	0.000775 ± 0.000333
Von Bertalanffy	445.4101 ± 8.8223	0.112058 ± 0.0409	0.000817 ± 0.000344

$\hat{\beta}_1$ = asymptote (estimated value of the variable at maturity); $\hat{\beta}_2$ = integration constant; $\hat{\beta}_3$ = maturity index.

Table 17 - Inflection points (IP) and age at IP estimated by the Gompertz, Hill, Logistic I and II, and von Bertalanffy models used to describe the growth curve of Weight of Mangalarga Marchador stallions.

Model	IP (kg)	Age at IP (days)
Gompertz	163.84	-1247.76
Hill	2.62	291.23
Logistic I	222.33	-1003.74
Logistic II	222.33	-1004.03
von Bertalanffy	131.98	-1334.29

The goodness of fit for all models is shown in Table 18. Logistic I and II models showed the lowest values for the AICc and the BIC, indicating a better fitting. The Michaelis-Menten model has the closest values of the Logistics models for both AICc and BIC. Adjusted R² values

do not differ much among all models, with Logistic I and II the highest value, followed by the Michaelis-Menten model. For the ESS, Logistic I and II models presented the lowest values, followed by Gompertz. In relation to MAD, Meloun I exhibited the lowest value; Brody and Logistic I models consecutively. Only the Logistic I model has the value of APE closest to 0 (table 18).

In this study, the values of AICc, BIC and ESS were lower for the Logistic I and II models; for the adjusted R^2 value, both Logistic models presented the highest and identical values. Although Logistic I and II models presented similar results in the quality of adjustment, the Logistic I model had the lowest value for MAD and also presented the value of APE closer to zero, indicating better adjustment between the body weight values observed and predicted.

Table 18 - Goodness of fit for nonlinear models used to describe body Weight growth curve of Mangalarga Marchador stallions.

Model	AICc	BIC	Adj. R²	ESS	MAD	APE
Brody	1227.5869	1227.61754	0.2149	1541.153	31.97887	-0.90447
Gompertz	1227.5521	1227.58274	0.2151	1540.712	31.98131	-0.90856
Hill	1228.0111	1228.04174	0.2121	1546.617	31.93086	-0.91036
Logistic I	1227.5209	1227.55154	0.2153	1540.318	31.97974	-0.90162
Logistic II	1227.5209	1227.55154	0.2153	1540.318	31.98047	-0.90396
Meloun I	1227.5865	1227.61714	0.2149	1541.154	31.97864	-0.90324
Meloun II	1227.5865	1227.61714	0.2149	1541.153	31.97884	-0.90445
Michaelis-Menten	1226.24696	1226.30276	0.2166	1551.006	32.05051	-0.90805
Mitscherlich	1227.5865	1227.61714	0.2149	1541.153	31.97901	-0.90507
Von Bertalanffy	1227.5631	1227.59374	0.215	1540.853	31.98037	-0.90679

AICc = Corrected Akaike's Information Criterion; BIC = Bayesian Information Criterion; Adj. R² = Adjusted R²; ESS = Error Sum of Square; MAD = Mean Absolute Deviation; APE = Average Prediction Error.

Based on the goodness of fit, the Logistic I model was selected to describe the Weight growth curve, in addition to estimating the value of AGR (Fig. 12). The Weight growth curve presented by the Logistic I model is shown in Figure 11.

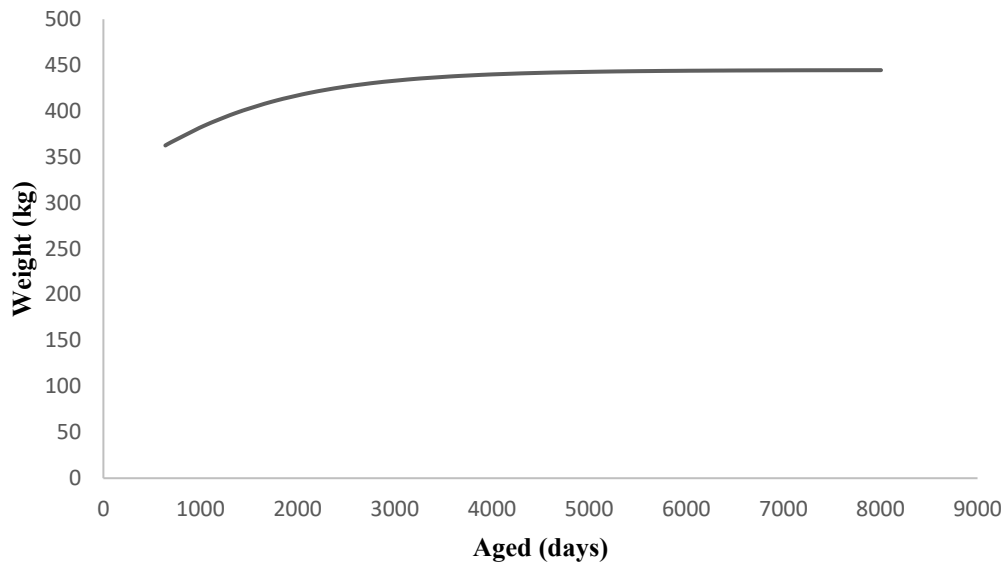


Fig. 11: Body Weight growth curve estimated by Logistic I model in Mangalarga Marchador stallions.

The collected animals are older than the point of greatest growth rate in relation to body weight, therefore, the peak of greatest growth velocity is not shown in the graph (Fig. 12). It is observed that the period between 638 and 2500 days, the body weight increased by 0.03448 kg per day; and finally, between 2501 and 8006 days, the increase is 0.003238 kg per day.

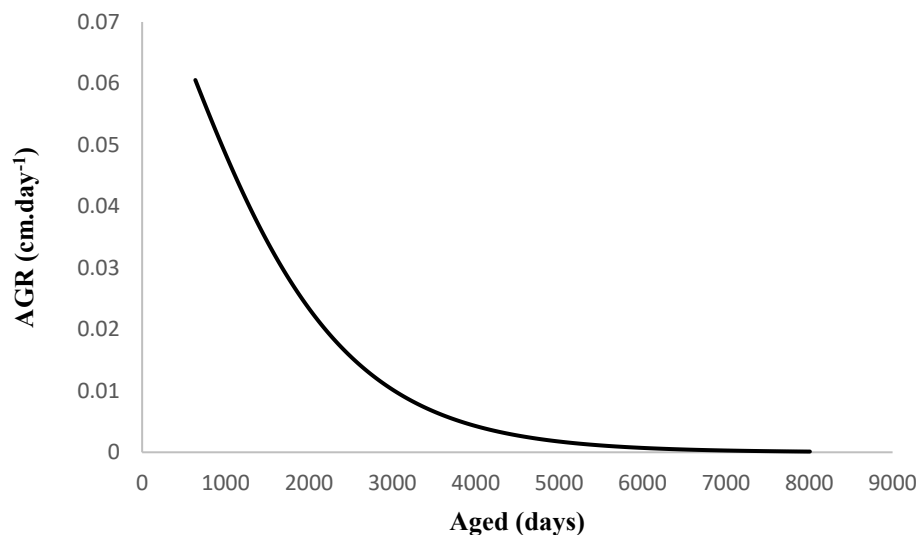


Fig. 12: Absolute Growth Rate (AGR) estimated by Logistic I model in Mangalarga Marchador stallions.

Regarding the Wither Height of Mangalarga Marchador stallions, the data collected are shown in Fig 13. The Wither Height measurements ranged from 139 cm to 157 cm. The mean population of stallions evaluated equal to 147.92 cm.

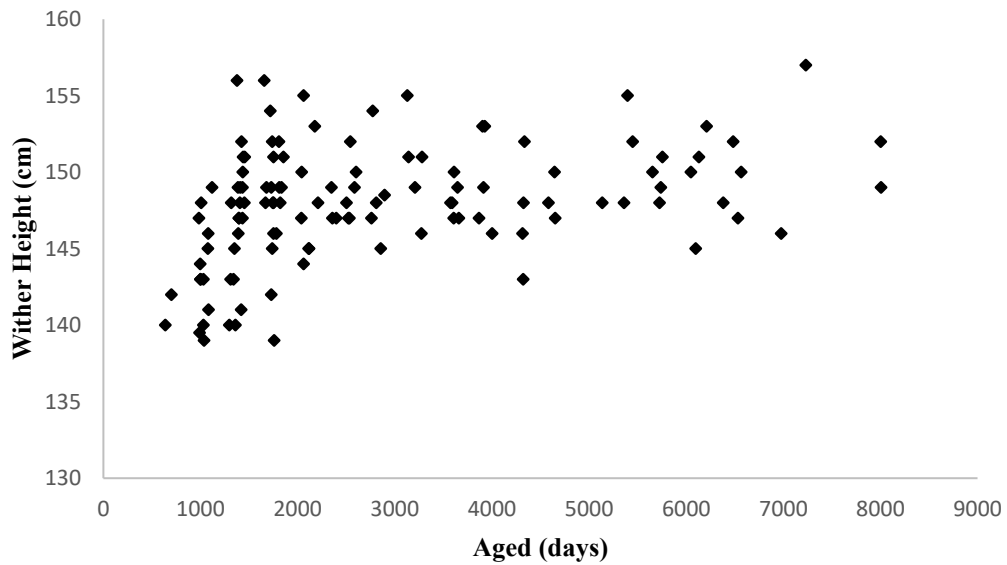


Fig. 13: Observed Wither Height of Mangalarga Marchador stallions from 638 to 8006 days of age.

The asymptote ($\widehat{\beta}_1$) of all models presented very close values, except the Michaelis-Menten model, whose value was the highest, equal to 151.2428 (table 19). The Logistic I and II models presented the lowest and similar values for asymptote: 149.347 and 149.3469 (table 19). For the Michaelis-Menten model, the $\widehat{\beta}_2$ value was 45.08869, too far from the inflection point value of the Logistic I and II model, whose values are 665.53 and 665.03 (table 20). In sequence, the highest values of the maturity index ($\widehat{\beta}_3$) were from the Logistic I and II and Gompertz models. The values are respectively 0.00198, 0.001981 and 0.00194. The Hill model presented the highest $\widehat{\beta}_3$ value, equal to 1.745171.

Estimated inflection point (IP) and age at IP showed an ample range of values between the Gompertz, Hill, Logistic I and II and von Bertalanffy models (table 20). Even so, none of models has a reliable inflection point (IP), because they estimated negative values for age at IP.

Table 19 - Parameter estimates for nonlinear models used to describe Wither Height of Mangalarga Marchador stallions.

Model	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$
Brody	149.3624 ± 0.4615	0.236112 ± 0.1117	0.001895 ± 0.000495
Gompertz	149.3533 ± 0.4590	0.251914 ± 0.1224	0.00194 ± 0.000506
Hill	149.924 ± 0.7397	153.1843 ± 76.5931	1.745171 ± 0.5160
Logistic I	149.347 ± 0.4570	0.267735 ± 0.1335	0.00198 ± 0.000517
Logistic II	149.3469 ± 0.4569	-1.31742 ± 0.4986	0.001981 ± 0.000517
Meloun I	149.3608 ± 0.4612	35.36988 ± 16.7035	0.001898 ± 0.000496
Meloun II	149.3614 ± 0.4613	-3.56481 ± 0.4720	0.001897 ± 0.000496
Michaelis-Menten	151.2428 ± 0.6387	45.08869 ± 7.6837	
Mitscherlich	149.3614 ± 0.4613	-759.833 ± 442.0	0.001897 ± 0.000496
Von Bertalanffy	149.3563 ± 0.4598	0.082188 ± 0.0396	0.001925 ± 0.000503

$\hat{\beta}_1$ = asymptote (estimated value of the variable at maturity); $\hat{\beta}_2$ = integration constant; $\hat{\beta}_3$ = maturity index.

Table 20 - Inflection points (IP) and age at IP estimated by the Gompertz, Hill, Logistic I and II, and von Bertalanffy models used to describe the growth curve of Wither Height of Mangalarga Marchador stallions.

Model	IP (cm)	Age at IP (days)
Gompertz	54.96	-710.48
Hill	32.01	72.56
Logistic I	74.67	-665.53
Logistic II	74.67	-665.03
von Bertalanffy	44.25	-727.34

The goodness of fit for all models is shown in Table 21. Logistic I and II models showed the lowest values for the AICc and the BIC, indicating a better fitting. The Gompertz model has values very close to the Logistic I and II models for both criteria (AICc and BIC). Adjusted R² values do not differ much among all models, with Logistic I and II the highest value, followed by the Gompertz model. For the ESS, Logistic I and II models presented the lowest values, followed by Gompertz model too. In relation to MAD, Logistic II exhibited the lowest value;

Logistic I and Gompertz models consecutively. The Logistic I model has the value of APE closest to 0 (table 21).

In this study, the values of AICc, BIC and ESS, were lower for the Logistic I and II models; for the adjusted R^2 value, both Logistic models present the highest and identical values. Logistic II model had lower value for MAD; however, the Logistic I model presented the value of APE closest to zero, indicating better fit between the observed and estimated WH values.

Table 21 - Goodness of fit for nonlinear models used to describe Wither Height of Mangalarga Marchador stallions.

Model	AICc	BIC	Adj. R^2	ESS	MAD	APE
Brody	630.3809	630.4115	0.2488	10.62882	2.549824	-0.04861
Gompertz	630.3309	630.3615	0.2491	10.62439	2.548928	-0.04863
Hill	631.5507	631.5813	0.2414	10.73297	2.569383	-0.04931
Logistic I	630.2809	630.3115	0.2494	10.62006	2.548388	-0.04806
Logistic II	630.2809	630.3115	0.2494	10.62006	2.548265	-0.04888
Meloun I	630.3805	630.4111	0.2488	10.62882	2.549789	-0.04839
Meloun II	630.3805	630.4111	0.2488	10.62882	2.549795	-0.04858
Michaelis-Menten	631.86	631.9158	0.2325	10.95105	2.604472	-0.05026
Mitscherlich	630.3805	630.4111	0.2488	10.62882	2.549814	-0.04843
Von Bertalanffy	630.3469	630.3775	0.249	10.62585	2.549202	-0.04849

AICc = Corrected Akaike's Information Criterion; BIC = Bayesian Information Criterion; Adj. R^2 = Adjusted R^2 ; ESS = Error Sum of Square; MAD = Mean Absolute Deviation; APE = Average Prediction Error.

The Logistic I model was selected to describe the Wither Height growth curve, due to the values for goodness of fit. In addition, it was used to estimate the value of AGR (Fig. 15). The Wither Height growth curve presented by the Logistic I model is shown in Figure 14

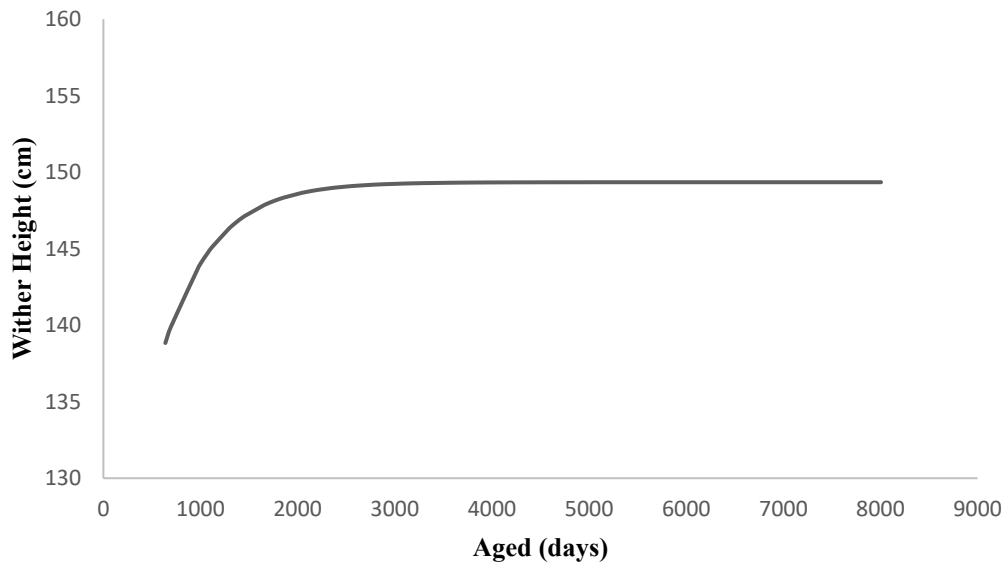


Fig. 14: Wither Height growth curve estimated by Logistic I model in Mangalarga Marchador stallions.

The collected animals are older than the point of greatest growth rate in relation to wither height, therefore, the peak of greatest growth velocity is not shown in the graph (Fig. 15). It is observed that the period between 638 and 1500 days, the Wither Height increased by 0.00984 cm per day; between 1501 and 2000 days, growth was 0.002525 cm per day; and finally, between 2001 and 8006 days, the increase is 0.0001260 cm per day.

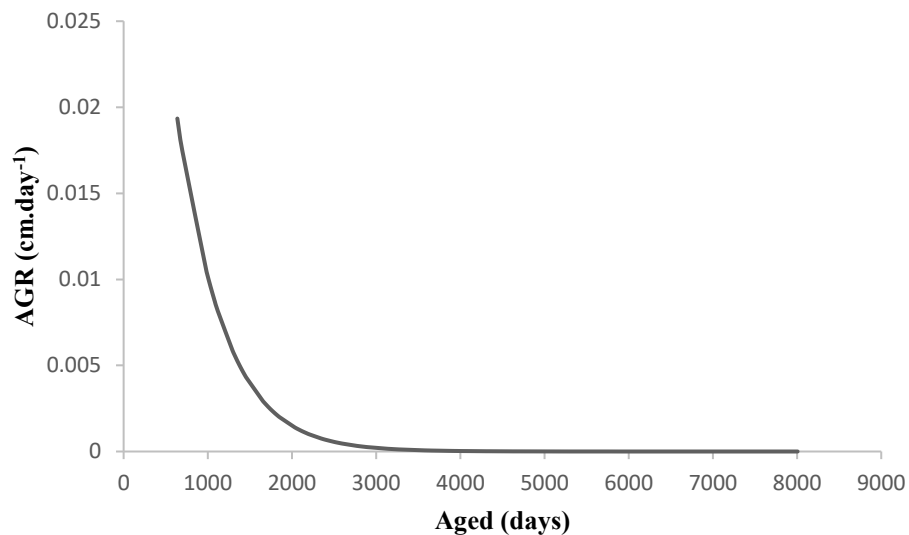


Fig. 15: Absolute Growth Rate (AGR) estimated by Logistic I model in Mangalarga Marchador stallions.

4 DISCUSSION

Regarding testicular biometrics, Oliveira (2014) and Rua (2014) reported higher general means than observed in the present study for width and height of the right and left testicles; the general means presented for the right and left testicular length are similar. Rua (2014) evaluated Mangalarga Marchador stallions and reported values higher than the general means of TV observed in the present study.

The values observed for BW, TC and WH were similar to those described in the literature for the Mangalarga Marchador breed (ZAMBORLINI, 1996; CABRAL et al., 2004; LAGE et al., 2009; GONÇALVES et al., 2012; LIMA et al., 2012; SANTIAGO et al., 2016).

As presented by other authors (THOMPSON et al., 1979; MANSO FILHO et al., 2000; OLIVEIRA, 2014; RUA, 2014), in the present study there are significant increase ($p < 0.05$) of testicular size with advancing age, including TV (HAFEZ & HAFEZ, 2004; RIBAS, 2006; ANGUS et al., 2011; MENDES, 2012; OLIVEIRA, 2014; and RUA, 2014). The younger animals (GI < 4 years) mostly present lower testicular measurements than animals older than 8 years (GIII).

Regarding TSW, the mean values reported by Thompson et al. (1979) were similar to observed in the present study. This author reported mean 9.6 cm, 10.0 cm and 10.9 cm for groups 2-3 years, 4-6 years and more than 7 years, respectively. Thompson et al. (1979) found a significant difference ($p < 0.05$) when comparing these groups (GI and GII) with GIII, suggesting the age at sexual maturity of the stallions is equal to or greater than 7 years. Oliveira's work (2014) also presented similar results.

According to this study, stallions of GI (< 4 years) have lower mean TSW ($p < 0.05$) than animals of GIII (> 8 years). However, GII (4-8 years) has no statistical difference for TSW ($p > 0.05$) in relation to GIII (> 8 years), because the intermediate group encompasses both developing animals and stallions have already reached sexual maturity.

Analyzing the data in table 5, the significant increase was evident ($p < 0.05$) of BW and CT within the three age groups (GI, GII and GIII). However, WH has different behavior: between GI and GII, the mean of WH increases significantly ($p < 0.05$), while GII and GIII showed no statistical difference. This result reinforces the opinion of Nascimento (1999), which suggests the body development of MM horses is concluded at the age of 5.

In the present study, it was verified the tendency of LTW to be higher than RTW in GI (< 4 years) and GII (between 4 and 8 years), as well as LTV being higher than RTV in GI (table 6). Oliveira (2014) and Borges et al. (2010) also presented a difference in size between the testicles, with the measurement of the left testicle the highest. Hafez and Hafez (2004) affirm the left testicle develops earlier and faster than the right, which explains the divergence found between the measurements of the left and right testicles.

Table 7 shows all testicular parameters moderately correlated ($r = 0.42$ to 0.54), positive and with high significance ($p < 0.01$) with the BW of the animal, similar to the results found by Thompson et al. (1979) and Cruz et al. (2009). Regarding the correlation coefficient between testicular parameters and age, the classification is low to moderate ($r = 0.24$ to 0.45), positive and with high significance ($p < 0.01$), as presented by Thompson et al. (1979) and Mendes (2012). These results demonstrate the influence of body condition on reproductive characteristics, and BW is the most influential characteristic on testicular development of animals.

In the present study, there are the highly significant phenotypic correlations ($p < 0.01$), moderate and positive between WH and TSW ($r = 0.51$), as well as between WH and VT ($r = 0.53$). In other studies, these correlations were not found, making it impossible to compare the results. Despite the lack of research, it is possible to infer the mathematically significant interrelationship between body and biometric measurements.

The estimate of the phenotypic correlation between TSW and TV (table 7) was high, positive and highly significant ($r = 0.85$; $p < 0.01$), allowing the estimation of good breeders based on TSW measurement, since VT is related to the amount of testicular parenchyma and sperm production (THOMPSON et al., 1979; LOVE et al., 1990; ROBALO SILVA, 2007; FREITAS, 2010; ANGUS et al., 2011;). In cattle, there is also the report of the high and positive phenotypic correlation between VT and scrotal circumference (parameter corresponding to TSW), ranging from $r = 0.77 - 0.93$ (UNANIAN et al., 2000; DIAS et al., 2008; SILVEIRA et al., 2012).

The highest magnitude correlation between TH and TV ($r = 0.91$; $p < 0.01$), in relation to the other biometric measurements, as well as the moderate correlation coefficient between TH and age ($r = 0.45$; $p < 0.01$), suggest the greater influence of TH on TV, besides the growth of the testicles mainly in height.

The β_1 parameter refers to the value of the variable to adulthood. Therefore, first it refers to the total scrotal width (TSW); then to total testicular volume (VT); body weight (BW) and, finally, at withers height (WH). In the four variables analyzed, logistic I and II models presented the lowest estimate, approximating the calculated result to the general mean of TSW.

The β_2 parameter is considered an integration constant without biological interpretation, except for the Michaelis-Menten model. Due to the overestimation of the asymptote (β_1) and the low quality of adjustment for the four variables analyzed, the Michaelis-Menten model proved not to be adequate to the data set of the present study.

The β_3 parameter, in turn, is related to the maturation rate and determines the inclination of the curve (LOAIZA-ECHEVERRI et al., 2013). The maturation rate can be understood as indicator of the speed which the animal approaches its adult size. For the four variables analyzed, logistic I and II models had very similar results, remaining in second position regarding the decreasing classification of all the results obtained. Only the Hill model obtained the highest value in all cases, but it also overestimates the asymptote (β_1) and presents low quality of adjustment for the four variables analyzed

The low values calculated for the maturity index (β_3) of TSW and TV, demonstrate how long the testicular development process is in stallions. This fact is demonstrated in the graphs of the growth curves and corroborates with the literature (JOHNSON & THOMPSON, 1983; NADEN et al., 1990; ROSER, 2000; HAFEZ & HAFEZ, 2004; and HESS & ROSER, 2005).

The inflection point is evidenced by the high growth rate and is related to the puberty of the animal (NOTTER et al. 1985; NIETO et al. 2006; LOAIZA ECHEVERRI et al. 2013). The interpretation of the results for IP and age at IP in this study was variable. For TSW and TV, the results presented by the Gompertz models and Logistic I and II are reliable. However, the PC and WH results were negative, invalidating their biological interpretation due to the age of the animals collected after the period of highest rate of body weight gain (REZENDE et al., 1984; NRC, 2007; GARCIA et al., 2011; SOUZA, 2017), as well as of the withers height (SANTOS, 1989; JORDÃO & CAMARGO, 1950).

For TSW, the inflection point (IP) may be related to the period called prepuberty by Hafez & Hafez (2004), which explains the fact that the estimated age to IP is far below the age at puberty recommended by Naden et al. (1990).

Based on the results of the β_1 , β_2 and β_3 parameters and the goodness of fit calculated in this work, the function chosen to model the growth curve of TSW, BW and WH of the Mangalarga Marchador stallions was Logistic I. Logistic II model was best fitted the VT. In all cases, the results related to the Gompertz model were very close. The absence of information on growth curves related to TSW and TV in horses makes it impossible to compare the values of the parameters (β_1 , β_2 , β_3), IP and age to IP.

Generally, in research on animal growth curves, the nonlinear models that best fit the data set are Gompertz, Logistic, Brody, Richards and von Bertalanffy (SOUZA, 2017), therefore, they are the most used. Logistic I model is commonly used to describe the testicular growth curve of bulls with moderate quality adjustment (QUIRINO et al., 1999; LOAIZA-ECHEVERRI et al., 2013). In addition, Logistic II and Gompertz models obtained results very close to Logistic I, favoring its use in testicular growth curves in bulls (FRENEAU et al. 1997; QUIRINO, et al., 1999; NIETO et al. 2006; LOAIZA-ECHEVERRI, 2013), as observed in the present study. In the case of the growth curve for BW, the von Bertalanffy (SOUZA, 2017) and Weibull models (SANTOS et al., 2007) were indicated in the literature. For WH, Logistic I (RIBEIRO et al., 2018), Logistic II (SOUZA, 2017), Weibull (SANTOS et al., 1999) and Richards models (SANTOS et al., 2007) were recommended. Considering the variation between the experiments, mainly related to the methodology and management conditions of the animals, it is common to find differences in the adjustment between the models for each research (SANTOS et al., 2007).

In the present study, the TSW growth curve showed an increase in testicular size up to approximately 2000 days. Additionally, TSW showed a faster growth rate in the period between 638 and 2000 days. This period coincides with the phase of sexual maturation described in the literature consulted (JOHNSON & THOMPSON, 1983; ROSER, 2000; and HESS & ROSER, 2005). The period between 2000 and 3000 days approximately is marked by the plateau in the growth curve; meanwhile, the speed became almost negligible.

For TV, the growth curve showed a rapid increase between 638 days and approximately 2000 days. From this point, the beginning of the plateau of the growth curve was evident and, close to 3000 days, the curve established the plateau. Unlike what happened with TSW, the speed of TV growth showed the peak maximum velocity in the period between 638 and approximately 1000 days. This peak coincides with the inflection point calculated for Logistic II model. After eminence, it was observed a considerable growth rate, although it was declining. The speed becomes almost negligible from 3500 days. The evaluation of data on testicular

volume growth velocity corroborates with the described by Hafez & Hafez (2004). The mentioned period (638 to 3500 days) covers all phases of stallion's development described in the literature consulted (THOMPSON et al., 1979; JOHNSON & THOMPSON, 1983; NADEN et al., 1990; ROSER, 2000; and HESS & ROSER, 2005).

TV is the most reliable measure of the prolonged testicular growth behavior of stallions, which allows their binding to testicular maturity. In order to explain this statement, some differences between the results obtained for TSW and TV are demonstrated. TV reached the plateau near 3000 days of age, later than the plateau reached by TSW (approximately 2500 days). The age at IP found for TV was older than TSW.

In order to identify which of the three biometric measurements (testicular width, length and height) directly influenced the dilation of the TV growth, logistic II model was used to elaborate the growth curve of each of the measurements. First, we noticed the wide variation between the three measures in relation to maturity index (β_3) and age to IP. The growth curves, in turn, demonstrated the subtle difference as to the moment at which each one begins to form the plateau of the growth curve, at 2000 days, it was noted that the curves referring to TL and TW have already reached the plateau, while TH still presents growth. Finally, the growth rates of each of the curves (allows us to infer testicular height (TH) is the one that most influenced the extent of testicular volume development, as it is the measure that remains with the highest growth rate over time. We did not find any other report in the literature about this observation.

Analyzing the graph corresponding to the BW growth curve, a subtle increase is noticed up to approximately 2000 days; while the evaluation of the graph referring to the speed of growth shows, in the period between 638 and 2000 days, a considerable growth rate, despite being declining. The plateau in the growth curve became evident after approximately 2500 days. The speed becomes almost negligible around 5700 days, demonstrating that the animals still have weight gain for a prolonged time, but at a very small rate.

For WH, the graph corresponding to the growth curve (fig. 14) has a considerable increase between 638 and 1500 days approximately; while the evaluation of the graph referring to growth rate (fig. 15) demonstrates the presence of a considerable growth rate, despite being falling abruptly. From approximately 2000 days, the plateau in the growth curve is evident (fig. 14); while the growth rate is very low, approaching abscissa just before 3000 days (fig. 15).

5 CONCLUSION

Testicular biometry can be included in the genetic selection programs of Mangalarga Marchador stallions with the same relevance as the morphometric characteristics. In addition, the use of nonlinear models to describe the growth curve, by the cross-sectional method of obtaining data, can be applied in the study of TSW, TV, BW and WH in Mangalarga Marchador stallions, in a wide age group (638 to 8006 days). For TSW, BW and WH, the most indicated model is Logistic I; while for TV, the Logistic II model.

REFERENCES

AKAIKE, H. A new look at the statistical model identification. **IEEE Transaction on Automatic Control**, v. 19, p. 716-23, 1974.

ANGUS, O. MCKINNON; EDWARD, L. S.; WENDY, E.V.; DICKSON, D. V. **Equine Reproduction**. 2^a (ed). ed. Angus, O., Mckinnon. 3310 p. 2011.

BORGES, G. S.; VAZ DE MELLO, M. I.; MAMBRINI, J. V. M.; SOECK, P. P. N. Biometria testicular de garanhões da raça Campolina. B. **Indistr. Anim.**, N. Odessa, v. 67, n. 2, p.157-162, 2010.

BOZDOGAN, Hamparsum. Model selection and Akaike's information criterion (AIC): The general theory and its analytical extensions. **Psychometrika**, v. 52, n. 3, p. 345-370, 1987.

BRINKS J. S. Relationships of scrotal circumference to puberty and subsequent reproductive performance in male and female offspring. **In**: FIELDS M.J.; SAND R.S., editors. Factors affecting calf crop. Boca Raton: CRC, p. 363–370, 1994.

BRODY, S. **Bioenergetics and Growth, With Special Reference to the Efficiency Complex in Domestic Animals**. Reinhold Publishing Co, New York, 1945.

CABRAL, G. C.; ALMEIDA, F. Q. D.; QUIRINO, C. R.; AZEVEDO et al. Avaliação morfométrica de equinos da raça Mangalarga Marchador: índices de conformação e proporções corporais. **Revista Brasileira de Zootecnia**, 33, 1798-1805, 2004.

COULTER G. H.; FOOTE R. H. Bovine testicular measurements as indicators of reproductive performance and their relationship to productive traits in cattle: a review. **Theriogenology** . v.11, p. 297–311, PMID: 16725414, 1979.

CRUZ, A. et al. Testicular measurements in Mangalarga Marchador stallions. **Revista Brasileira de Medicina Veterinária**, v. 31, n. 1, p. 30-34, 2009.

DANCEY, C.; REIDY, J. **Estatística Sem Matemática para Psicologia**: Usando SPSS para Windows. Porto Alegre: Artmed, 2006.

DIAS, J. C.; ANDRADE, J. V.; MARTINS, J. A. M. et al. Correlações genéticas e fenotípicas entre características reprodutivas e produtivas de touros da raça Nelore. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.43, n.1, p.53-59, 2008.

FREITAS, B. W. **Parâmetros fisiológicos e seminais de garanhões da raça Mangalarga Marchador na região da Zona da Mata Mineira do decorrer das estações climáticas**. 2010. Dissertação (Mestrado em Medicina Veterinária) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.

FRENEAU, G.E.; QUIRINO, C.R.; CONCEIÇÃO, JR.V. et al. Curvas de crescimento da circunferência escrotal em touros Nelore. **Revista Brasileira de Reprodução Animal**. v.21, n. 2, p. 32-34, 1997.

GARCIA, F. P. S. et al. Determinação do crescimento e desenvolvimento de potros puro sangue inglês em Bagé-RS. **Revista Portuguesa de Ciências Veterinárias**, Lisboa, v.106, p. 43-46, 2011.

GODOI, F.N. Avaliação cinemática de variáveis relacionadas ao resultado dos saltos de potros. 2012. 149f. Tese (Doutorado em Zootecnia). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2012.

GOMPertz, B. On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies. **Philosophical transactions of the Royal Society of London**, v. 115, p. 513-83, 1825.

GONÇALVES, R. W. et al. Efeito da endogamia sobre características morfológicas em cavalos da raça Mangalarga Marchador. **Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.**, v.64, p.419-426, 2012.

GOUTELLE, S.; MAURIN, M.; ROUGIER, F.; BARBAUT, X.; BOURGUIGNON, L.; DUCHER, M. et al. The Hill equation: a review of its capabilities in pharmacological modelling. **Fundamental and Clinical Pharmacology**, v. 22, p. 633-648, 2008.

HAFEZ, E. S. E. Anatomia da reprodução masculina. HAFEZ, E. S. E.; HAFEZ, B. **Reprodução animal**. 7ª ed. Barueri:, SP: Manole, cap. 1, p. 3-12, 2004.

HESS, M. F.; ROSER, J. F. A comparison of the effects of equine luteinizing hormone (eLH), equine growth hormone (eGH) and human recombinant insulin-like growth factor (hrIGF-I) on steroid production in cultured equine Leydig cells during sexual maturation. **Animal reproduction science**, v. 89, n. 1-4, p. 7-19, 2005.

HILL, A. V. The possible effects of the aggregation of the molecules of haemoglobin on its dissociation curves. **J. Physiol.**, v. 40, p. 4-7, 1910.

JOHNSON, L.; THOMPSON J.R., DONALD L. Age-related and seasonal variation in the Sertoli cell population, daily sperm production and serum concentrations of follicle-stimulating hormone, luteinizing hormone and testosterone in stallions. **Biology of Reproduction**, v. 29, n. 3, p. 777-789, 1983.

JORDÃO, L. P.; CAMARGO, M. X. Estudo sobre algumas medidas do cavalo Mangalarga criado na Coudelaria Paulista. **Bol. Ind. Anim.**, v.11 (3/4): p. 81-95, 1950.

KNIGHTS S. A.; BAKER R. L.; GIANOLA D.; GIBB J. B. Estimates of heritabilities and of genetic and phenotypic correlations among growth and reproductive traits in yearling Angus bulls. **J Anim Sci**, v. 58(4), p. 887- 893, PMID: 6725151, 1984.

KSHIRSAGAR, A.; SMITH, W. Growth curves. **CRC Press**, 1995.

LAGE, M. C. G. R. *et al.* Associação entre medidas lineares e angulares de equinos da raça Mangalarga Marchador. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 61, p.968-979, 2009.

LIMA, L. P. *et al.* Medidas lineares de equinos da raça Mangalarga criados na região de Itapetinga-Ba. **In: VII CONNEPI-Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação**. 2012.

LOAIZA-ECHEVERRI, A. M. *et al.* Use of nonlinear models for describing scrotal circumference growth in Guzera bulls raised under grazing conditions. **Theriogenology**, v. 79, p. 751-759, 2013.

LOVE, C. C.; GARCIA, M. C.; RIERA, F. R.; KENNEY, R. M. Use of testicular volume to predict daily sperm output in the stallion. **In: Proceedings Of Annual Convention Of The American Association Of Equine Practitioners**, p. 15–20, 1990.

LUNSTRA, D. D. Testicular development and onset of puberty in beef bulls. **In: Beef Research Program Progress Report**, v.1, p. 26, 1982.

MANSO FILHO, H. C. *et al.* Testicular Measurements in Campolina Stallions. **Journal of Equine Veterinary Science**, p. 277-278, 2000.

MELOUN, M.; MILITKÝ, J. Sbirka uloh, Statisticke zpracovani experimentalnich dat. Pardubice: Universita Pardubice. 1996. Disponível em: <https://meloun.upce.cz/docs/books/ucebnice.1994.pdf> Acesso em: 20/04/2018.

MENDES, L. Q. **Aspectos biométricos e histológicos de testículos de garanhões da raça crioula**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciências Veterinárias). Universidade Federal do Rio Grande do Sul – RS, 2012.

MICHAELIS, L.; MENTEN, M. L. Die kinetik der invertinwirkung. **Biochemische Zeitschrift**, v. 49, p. 334-6, 1913.

NADEN, J., AMANN, R. P., SQUIRES, E. L. Testicular growth, hormone concentrations, seminal characteristics and sexual behaviour in stallions. **Journal of Reproduction and Fertility**. v. 88, p. 167-176, 1990

NASCIMENTO, J. F. Mangalarga Marchador: Tratado Morfofuncional. **Belo Horizonte: ABCCMM**. 1999.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL-NRC, 2007. **Nutrient Requirements of Horses**, United States of America: Washington DC. 2007.

NIETO, L. M.; SILVA, L. O. C.; GONDO, A. Análise da curva de crescimento do perímetro escrotal de touros Canchim em diferentes sistemas de criação. **Arquivos de Ciências Veterinárias e Zoologia da Unipar**, v. 9, p. 99-103, 2006.

NOTTER, D. R.; LUCAS, J. R.; MCCLAUGHERTY, F. S.; COPENHAVER, J. S. Breed group differences in testicular growth patterns in spring-born ram lambs. **Journal Animal Science**, v. 60, p. 622-631, PMID: 3988639, 1985.

NOTTER, D.R.; McFADDEN, L.G.; BERGMANN, J.A. G. Relationship between yearling scrotal circumference and measures of female reproduction in Angus cattle. **In: BEEF IMPROVEMENT FEDERATION - BIF**, 25., 1993, Asheville, North Carolina. Proceedings... Asheville, North Carolina. Arville, FIF, 1993, p. 180-184, 1993.

OLIVEIRA, R. R. **Parâmetros reprodutivos de garanhões da raça Mangalarga Marchador em função da faixa etária** (comportamento, biometria testicular, aspectos seminais, resistência ao refrigeração e congelamento de sêmen). 2014. Tese (Doutorado em Zootecnia). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2014.

PICKETT, B.W. Reproductive evaluation of the stallion. **In:** MCKINNON, A. O.; VOSS, J. L. (Eds.). Philadelphia: Lea & Febiger, p. 755-768, 1993.

PICKETT, B. W.; VOSS, J. L.; BOWEN, R. A.; SQUIRES, E. L.; MCKINNON, A. O. Seminal characteristics and total scrotal width (T.S.W.) of normal and abnormal stallions. **Proceedings of the 33rd Annual Convention of the American Association of Equine Practitioners.** p.487-518, 1987.

PINTO, L. F. B. *et al.* Análise multivariada das medidas morfométricas de potros da raça Mangalarga Marchador: análise fatorial. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.34, n. 2, p. 613-626, 2005.

PLANALTO (DF). Decreto n. 12975, de 19 de maio de 2014. Dispõe sobre a declaração do cavalo Mangalarga Marchador como raça nacional. Dilma Rousseff, 193º da Independência e 126º da República. 2014. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/CCIVIL_03/_Ato2011-2014/2014/Lei/L12975.htm. Acesso em: 15/06/2019.

QUIRINO, C. R.; BERGMANN, J.A.G.; VALE FILHO, V.R.; ANDRADE, V.J.; PEREIRA, J.C.C. Evaluation of four mathematical functions to describe scrotal circumference maturation in Nellore bulls. **Theriogenology**, v. 52, p. 25-34, 1999.

REZENDE, A. S. C. *et al.* Efeito de nível do concentrado suplementar sobre o crescimento de potros pós-desmama. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, Belo Horizonte, v.38, n.6, p.927-941, 1984.

RIBAS, J. A. S. Influência das estações cheia e seca nas características reprodutivas e seminais de garanhões da raça Pantaneira no Pantanal de Poconé-MT. 2006.

RIBEIRO, R. A. *et al.* Curva de crescimento em altura na cernelha de equinos da raça Mangalarga Marchador considerando-se heterocedasticidade. **Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.**, Belo Horizonte, v. 70, n. 1, p. 272-278, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-4162-9322>. Acesso em: 13/04/2019

RICHARDS, F.J. A flexible growth function for empirical use. **J Exp Bot**, v. 10, p. 290-301, 1959.

ROBALO SILVA, J.; AGRÍCOLA, R.; BARBOSA, M.; LOPES da COSTA, L. Variação sazonal do volume testicular, da produção e qualidade do sêmen e do comportamento sexual de cavalos Lusitanos. **Revista Portuguesa de Ciências Veterinárias**, v. 102, p. 119-125, 2007.

ROSER, J. F. Testicular Function and Fertility. **Journal of Equine Veterinary Science**, v.20, n.2, p. 90-93, 2000.

RUA, M. A. S. **Biometria testicular, avaliação do sêmen e do comportamento sexual de garanhões do norte do estado do Rio de Janeiro**. 2014. Dissertação (Mestrado em Produção Animal). Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias. Universidade Estadual Do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, 2014.

SANTIAGO, J. M. *et al.* Evolution of morphometric measures in the Mangalarga Marchador breed. **Rev. Caatinga**, v.29, p.191-199, 2016.

SANTOS, S. A. **Estudo sobre algumas características de crescimento de cavalos Brasileiro de Hipismo produzidos no haras Pioneiro**. 1989. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 1989.

SANTOS, S. A. *et al.* Monitoramento do desenvolvimento de cavalos pantaneiros por meio de curvas de crescimento. **Archivos de Zootecnia**, v. 56, n. Su1, p. 647-654, 2007.

SANTOS, S. A.; OLIVEIRA, M. R. D.; SERENO, J. R. Using nonlinear models to describe height growth curves in pantaneiro horses. **Pesqui. Agropecu. Bras.** v.34, p.1133-1138, 1999.

SAS. SAS/STAT User's Guide Statistics. Cary, NC: SAS Inst., Inc.; 2002.

SCHWARZ G. Estimating the dimension of a model. **Annals of Statistics**. v. 6, p. 461-464, 1978

SILVEIRA, F.; SILVA, F. F.; CARNEIRO, P. L. S.; MALHADO, C. H. M. Classificação multivariada de modelos de crescimento para grupos genéticos de ovinos de corte. **Rev Bras Saúde Prod Anim**, v. 13, p. 62-73, 2012.

SOUZA, F. A. C. **Curvas de crescimento em equinos da raça Mangalarga Marchador utilizando método transversal**. 2017 Dissertação (Mestrado em Zootecnia). Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2017.

SOUZA, L. A.; CARNEIRO, P. L. S.; MALHADO, C.H.M.; SILVA, F.F.; SILVEIRA, F.G. Traditional and alternative nonlinear models for estimating the growth of Morada Nova sheep. **Revista Brasileira Zootecnia**, v. 42, p.651-655, 2013.

STOUT, T. A. E.; COLENBRANDER, B. Reproductive Parameters of Draft Horse, Friesian and Warmblood Stallions. **In**: MCKINNON, Angus O. et al. (Ed.). Equine reproduction. John Wiley & Sons, p. 1362-1366, 2011.

THOMPSON, D. J.; PICKETT, B. W.; SQUIRES, E. L.; AMANN, R. P. Testicular measurements and reproductive characteristics in stallion. **Journal of Reproduction and Fertility**, v. 27, p. 13-17, 1979.

TOELLE Y. D., ROBISON O. W. Estimates of genetic correlations between testicular measurements and female reproductive traits in cattle. **J Anim Sci**; v. 60, p. 89–100, PMID: 3972752, 1985.

UNANIAN M. M.; SILVA A. E. D. F.; MCMANUS C.; CARDOSO E. P. Características Biométricas Testiculares para Avaliação de Touros Zebuínos da Raça Nelore [Testicular Biometrics Characteristics to Evaluate the Nelore Zebu Breed Bulls. **Rev Bras Zootec.**, v. 29, p.136–144, 2000.

VON BERTALANFFY, L. Quantitative laws for metabolism and growth. **Q Rev Biol**, v.32, p. 217-231, 1957.

ZAMBORLINI, L. C. *et al.* Estudo genético quantitativo de medidas lineares de equinos da raça mangalarga marchador - I. Estimativas dos fatores de ambiente e parâmetros genéticos. **Revista Brasileira de Ciências Veterinárias**, Niterói, v. 3, n. 2, p. 3337, 1996.