

AJUSTE DE MODELOS NO LINEALES Y ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE CRECIMIENTO EN BOVINOS TROPICARNE

ADJUSTMENT OF NONLINEAR MODELS AND ESTIMATION OF GROWTH PARAMETERS IN TROPICARNE CATTLE

Joel Domínguez-Viveros¹, F. Alonso Rodríguez-Almeida^{1*}, Rafael Núñez-Domínguez²,
Rodolfo Ramírez-Valverde², J. Ángel Ortega-Gutiérrez¹, Agustín Ruiz-Flores²

¹Facultad de Zootecnia y Ecología. Universidad Autónoma de Chihuahua. Periférico Francisco R. Almada km 1. 31453. Chihuahua, Chihuahua. (frodrigu@uach.mx). ²Zootecnia. Universidad Autónoma Chapingo. 56230. Chapingo, Estado de México. (rafael.nunez@correo.chapingo.mx).

RESUMEN

El análisis del crecimiento con modelos de regresión no lineal (MNL) permite derivar parámetros (PC) e indicadores (IC) de crecimiento bajo condiciones específicas de producción que pueden ser considerados en los programas de mejoramiento genético. Los objetivos de este estudio fueron seleccionar y ajustar un MNL al crecimiento de bovinos Tropicarne criados en la vertiente del Golfo de México. Los MNL evaluados fueron Brody, Logístico, Bertalanffy y Gompertz. La información de crecimiento analizada correspondió a 12890 pesos mensuales, del nacimiento a los 24 meses de edad de 1787 animales. Los PC estimados fueron peso adulto (PAD) y tasa de madurez (TM); así como los IC, edad (EPI) y peso al punto de inflexión (PPI), edad al 50 % de madurez (E50M) y porcentaje de madurez a los 18 meses de edad (GM18). Los análisis se realizaron con el procedimiento NLIN de SAS. La selección de modelos se hizo con base en el error de predicción promedio, la varianza del error de predicción, el coeficiente de determinación múltiple y ajustado, el estadístico Durbin-Watson y el criterio de información Akaike. El modelo Brody, seguido por el modelo Bertalanffy, mostró un mejor ajuste con estimaciones de 467.5 y 378.8 kg para PAD y 0.0612 y 0.132 kg kg⁻¹ mes⁻¹ para TM. Las derivaciones de EPI, PPI, E50M y GM18 fueron 3.8 meses, 112.2 kg, 7.4 meses y 85 %. El modelo de Brody permitió describir mejor el crecimiento de bovinos Tropicarne, lo que implica TM lentas, características del crecimiento de los bovinos en el trópico, a diferencia de la curva sigmoidea típica para algunas razas en climas templados.

ABSTRACT

Growth analysis with non-linear regression models (NLM) allows deriving parameters (GP) and indicators (GI) of growth under specific production conditions that can be taken into account in genetic improvement programs. The objectives of this study were to select and adjust a NLM to the growth of Tropicarne cattle raised in the Gulf of México coastline. The NLM evaluated were Brody, Logistic, Bertalanffy and Gompertz. The growth information analyzed corresponded to 12 890 monthly weigh-ins, from birth to 24 months of age, in 1787 animals. The GP estimated were adult weight (AW) and maturity rate (MR); and the GI, age (API) and weight (WPI) at point of inflection, age at 50 % of maturity (A50M) and percentage of maturity at 18 months of age (PM18). The analyses were carried out with the NLIN procedure of SAS. The selection of models was done based on the average prediction error, variance of the prediction error, multiple and adjusted determination coefficient, the Durbin-Watson statistic, and the Akaike information criterion. The Brody model, followed by the Bertalanffy model, showed a better adjustment with estimations of 467.5 and 378.8 kg for AW, and 0.0612 and 0.132 kg kg⁻¹ month⁻¹ for MR. Derivations of the API, WPI, A50M and PM18 were 3.8 months, 112.2 kg, 7.4 months and 85 %. The Brody model allowed a better description of the growth of Tropicarne cattle, which implies slow MR, characteristic of the growth of bovines in the tropics, in contrast with the typical sigmoid curve for some breeds in temperate climates.

Keywords: model selection, Brody, Bertalanffy, tropical cattle, growth curve.

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: Febrero, 2012. Aprobado: Noviembre, 2012.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 47: 25-34. 2013.

Palabras clave: selección modelos, Brody, Bertalanffy, bovinos trópico, curva crecimiento.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de los bovinos de razas *Bos taurus* especializadas para carne y en ambientes templados, está caracterizado por una curva de tipo sigmoideo de tres fases: un crecimiento lento inicial, una fase de aceleración pronunciada y un período de desaceleración, hasta alcanzar el peso adulto (DeNise y Brinks, 1985; Lawrence y Fowler, 2002). Pero, la forma y características de la curva de crecimiento pueden variar en función del ambiente y del sistema de producción (Brown *et al.*, 1976; Owens *et al.*, 1993). En los sistemas de producción del trópico se han adaptado las razas *Bos indicus* y algunas cruzas con razas europeas (Plasse, 1978). Según Morris *et al.* (1992) y Mejía-Bautista *et al.* (2010), en las razas *B. taurus* se reduce su comportamiento productivo porque no se adaptan a las condiciones extremas del ambiente tropical, en comparación con las razas *B. indicus*. Pero incluso con estas últimas razas hay tasas bajas de crecimiento y de madurez, así como períodos predestete prolongados en climas tropicales, comparados con los obtenidos en climas templados.

Mediante modelos no lineales (MNL) se describe el cambio del crecimiento en función del tiempo y con un número reducido de parámetros que pueden tener una interpretación biológica (Fitzhugh, 1976; Plasse, 1978; Owens *et al.*, 1993). Con base en los parámetros de los modelos de crecimiento se pueden derivar otros indicadores como el grado de madurez a determinado tiempo, así como la edad y peso en el punto de inflexión (Blasco, 1999; Goyache, 2005; Ribeiro, 2005), que indican un cambio en la tasa de crecimiento. Los parámetros e indicadores de crecimiento de los MNL pueden considerarse en los criterios de selección de una raza, con el fin de modificar la forma de la curva de crecimiento (Blasco, 1999; Goyache, 2005). En el cambio del peso vivo del animal están involucrados factores aleatorios como el genotipo y los efectos ambientales que lo afectan en el tiempo, con efectos variables de acuerdo con la edad y el grado de madurez (DeNise y Brinks, 1985; Owens *et al.*, 1993; Lawrence y Fowler, 2002). Esa variabilidad genética y ambiental es importante en el desempeño productivo de los animales y puede considerarse en los programas de mejoramiento genético con base

INTRODUCTION

The growth of beef specialized *Bos taurus* breeds in temperate environments is characterized by a sigmoid type curve with three phases: an initial slow growth, a phase of pronounced acceleration and a period of deceleration, until reaching adult weight (DeNise and Brinks, 1985; Lawrence and Fowler, 2002). But the shape and characteristics of the growth curve can vary as a function of the environment and the production system (Brown *et al.*, 1976; Owens *et al.*, 1993). In tropical production systems, *Bos indicus* breeds and some of their crosses with European breeds have been adapted (Plasse, 1978). According to Morris *et al.* (1992) and Mejía-Bautista *et al.* (2010), the productive performance of *Bos taurus* breeds is reduced because they do not adapt to the extreme conditions of the tropical environment, as compared to the *B. indicus* breeds. But in tropical climates, even with these last breeds, low growth and maturity rates are observed, as well as extended pre-weaning periods, compared with those obtained in temperate climates.

The change in growth is described through non-linear models (NLM), as a function of time and a reduced number of parameters that can have a biological interpretation (Fitzhugh, 1976; Plasse, 1978; Owens *et al.*, 1993). Based on the parameters of the growth models, other indicators can be derived such as the degree of maturity at a specific time as well as the age and weight at the point of inflection (Blasco, 1999; Goyache, 2005; Ribeiro, 2005), which indicate a change in the growth rate. The parameters and indicators of growth, derived from NLM, can be taken into account in the selection criteria within a breed, with the aim of modifying the shape of the growth curve (Blasco, 1999; Goyache, 2005). Random factors are involved in the change of the animal's live weight, such as the genotype and the environmental effects that affect it throughout time, with variable effects according to age and degree of maturity (De Nise and Brinks, 1985; Owens *et al.*, 1993; Lawrence and Fowler, 2002). This genetic and environmental variability is important for the productive performance of animals and can be considered in genetic improvement programs based on genetic evaluations (Domínguez-Vivero *et al.*, 2003a). There are various NLM used to describe

en evaluaciones genéticas (Domínguez-Viveros *et al.*, 2003a). Existen diversos MNL para describir la curva de crecimiento de acuerdo con condiciones específicas (Ribeiro, 2005; Thornley y France, 2007), por lo cual es importante determinar cual proporciona un ajuste mejor.

Tropicarne es la primera raza sintética de bovinos para carne desarrollada en México, compuesta por razas *B. taurus* y *B. indicus*, adaptada a las condiciones tropicales cálidas de la vertiente del Golfo de México y en pastoreo (SAGAR, 1996; Ruiz-Flores *et al.*, 2006). Los criadores de Tropicarne implementaron un esquema de control de producción, pesando los animales cada mes, con el objetivo de analizar el crecimiento y definir sus esquemas de manejo y de mejoramiento genético. En la literatura revisada no se encontraron estudios que describan el crecimiento de bovinos Tropicarne a través del tiempo, por lo cual los objetivos del presente estudio fueron seleccionar un MNL con un ajuste mejor a la curva de crecimiento de bovinos Tropicarne y estimar parámetros e indicadores de crecimiento con el modelo no lineal de mejor ajuste.

MATERIALES Y MÉTODOS

La base de datos fue proporcionada por la Asociación Mexicana de Criadores de Ganado Tropicarne. Se analizaron 12890 registros de peso vivo mensual, desde el nacimiento hasta los 24 meses de edad, correspondientes a 1787 bovinos machos o hembras, nacidos entre 1990 y 2004. Los MNL evaluados para describir el crecimiento fueron: Brody, Logístico, Bertalanffy y Gompertz (Blasco, 1999; Goyache, 2005; Thornley y France, 2007), para los cuales los componentes sistemáticos se describen en el Cuadro 1. En todos los modelos se consideró el residual aleatorio con distribución normal e independiente. Los análisis se realizaron con el procedimiento NLIN (SAS, 2001) y se comparó el ajuste de los modelos con base en los criterios siguientes: 1) el error de predicción promedio (de Assuçãmpo *et al.*,

$$2005) EPP = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^t \left(\left(\frac{po - pe}{po} \right) * 100 / nt \right)$$

y la varianza del error de predicción $\left(VEP = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^t (po - pe)^2 / nt \right)$,

calculados mediante las diferencias entre el peso observado (po) y el estimado (pe) en todas las pesadas por individuo (t) y en todos los individuos (n) evaluados (Brown *et al.*, 1976; de Assuçãmpo *et al.*, 2005); 2) el coeficiente de determinación múltiple $R^2 = (1 - (scl/sct))$ y ajustado $R^2_{aj} = 1 - ((n-i)(1-R^2)/(n-k))$, estimados

the growth curve according to specific conditions (Ribeiro, 2005; Thornley and France, 2007), making it important to determine which one provides a better adjustment.

Tropicarne is the first synthetic beef cattle breed developed in México, composed by *B. taurus* and *B. indicus* breeds, adapted to grazing under warm tropical conditions of the Gulf of México (SAGAR, 1996; Ruiz-Flores *et al.*, 2006). Tropicarne breeders implemented a production record keeping program, weighing animals every month, with the objective of analyzing their growth and defining their management and genetic improvement schemes. In the literature reviewed no studies were found that describe the growth of Tropicarne cattle throughout time, so the objectives of this study were to select a NLM with the best adjustment to the Tropicarne cattle growth and to estimate parameters and indicators of growth with the non-linear model of best adjustment.

MATERIALS AND METHODS

The database was provided by the Mexican Association of Tropicarne Cattle Producers. Records of 12 890 monthly live weight records, from birth to 24 months of age, were analyzed, corresponding to 1787 males and females born between 1990 and 2004. The NLMs evaluated to describe the growth were: Brody, Logistic, Bertalanffy and Gompertz (Blasco, 1999; Goyache, 2005; Thornley and France, 2007), for which the

Cuadro 1. Ecuaciones de los modelos no lineales utilizados para describir el crecimiento de bovinos Tropicarne.

Table 1. Equations of non-linear models used to describe the growth of Tropicarne bovines.

Modelo	Ecuación [†]
Brody	$y = a*(1 - b*e^{(-c*t)})$
Logístico	$y = a / (1 + b*e^{(-c*t)})$
Bertalanffy	$y = a*(1 - b*e^{(-c*t)})^3$
Gompertz	$y = a*(e^{(-b*(e^{(-c*t)})})})$

[†]Componentes de los modelos no lineales utilizados: y=peso vivo del animal a la edad t; t=edad del animal en meses; a=peso adulto o asintótico en kg; b=constante de integración; c=pendiente de la curva relativa a la tasa de crecimiento (kg kg⁻¹ t⁻¹) ♦ Components of the non-linear models used: y=live weight of the animal at age t; t=age of animal in months; a=adult or asymptotic weight in kg; b=integration constant; c=slope of the curve relative to growth rate (kg kg⁻¹ t⁻¹).

con base en la suma de cuadrados del error (sce), la suma de cuadrados total corregida (sct), el número de observaciones (n) y el número de parámetros (k) que contiene el modelo (de Assumpção *et al.*, 2005; Noguera *et al.*, 2008); 3) el estadístico Durbin Watson (DW) para analizar las auto correlaciones en los errores (Durbin y Watson, 1951); 4) el criterio de información Akaike (AIC; Motulsky y Christopoulos, 2003) con el planteamiento $AIC=N \cdot \ln(sce/N)+(2k+1)$, donde N = número de observaciones, sce = suma de cuadrados de los residuales y k = número de parámetros en el modelo. El modelo con el valor menor se consideró como de ajuste mejor.

Para cada modelo se estimaron los parámetros de crecimiento peso adulto (PAD) o asintótico en kg y la pendiente de la curva relativa a la tasa de crecimiento o de madurez (TM) en $kg\ kg^{-1}\ mes^{-1}$, más una constante de integración. Después se derivaron los indicadores de crecimiento (Cuadro 2): edad (EPI) y peso al punto de inflexión (PPI), edad al 50 % de madurez (E50M) y grado de madurez (%) a los 18 meses de edad (GM18); con excepción en el modelo de Brody, el cual no permite calcular EPI y PPI.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los criterios utilizados para la comparación de modelos se presentan en el Cuadro 3. Con base en las estimaciones de parámetros de crecimiento (Cuadro 4) se ajustaron los MNL para predecir y describir el peso del bovino a través del tiempo en función de los modelos evaluados (Figura 1). Como complemento, en el Cuadro 5 se presentan los indicadores de crecimiento (EPI, PPI, GM18 y E50M) calculados con los parámetros de crecimiento presentados en el Cuadro 4 y con base en las ecuaciones

systematic components are described in Table 1. In all the models the random residuals were considered to be normal and independently distributed. The analyses were carried out with the NLIN procedure (SAS, 2001) and the adjustment of models was compared based on the following criteria: 1) the average prediction error (de Assuçãmpo *et al.*, 2005);

$$EPP = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^t \left(\left(\frac{po - pe}{po} \right) * 100 / nt \right) \text{ and the variance of the prediction error } \left(VEP = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^t (po - pe)^2 / nt \right),$$

calculated through the differences between the observed (po) and the estimated (pe) weight in all the weigh-ins per individual (t) and in all the individuals (n) evaluated (Brown *et al.*, 1976; de Assumpção *et al.*, 2005); 2) the multiple determination coefficient $R^2=(1-(sce/sct))$ and adjusted $R^2_{adj}=1-((n-i)(1-R^2)/(n-k))$, estimated based on the sum of the error squares (sce), the corrected total sum of squares (sct), the number of observations (n) and the number of parameters (k) that the model contains (de Assumpção *et al.*, 2005; Noguera *et al.*, 2008); 3) the Durbin Watson (DW) statistic to analyze auto-correlations in the errors (Durbin and Watson, 1951); 4) the Akaike information criterion (AIC; Motulsky and Christopoulos, 2003), with $AIC=N \cdot \ln(sce/N)+(2k+1)$, where N = number of observations, sce = sum of residual squares and k = number of parameters in the model. The model with the lowest value was considered as the one with the best adjustment.

For each model, the growth parameters adult or asymptotic weight (AW) in kg and the curve slope related to the growth or maturity rate (MR) in $kg\ kg^{-1}\ month^{-1}$ plus one integration constant were estimated. Later, the growth indicators age (API) and weight (WPI) at point of inflection, age at 50 % maturity

Cuadro 2. Ecuaciones para la derivación de indicadores de crecimiento: edad (meses; EPI) y peso (kg; PPI) al punto de inflexión, edad al 50% de maduración (meses; E50M) y grado de madurez (%; GM18) a determinada edad en bovinos Tropicarne, a partir de los modelos no lineales evaluados.

Table 2. Equations for deriving growth indicators; (months; API) and weight (kg; WPI) at point of inflection, age at 50 % of maturation (months; A50M) and degree of maturity (%; PM18) at a specific age in Tropicarne bovines, based on the non-linear models evaluated.

Modelo	EPI [†]	PPI [†]	E50M [†]	GM18 [†]
Logístico	$t = \ln b / c$	$y = a / 2$	$\ln[(a0.5/a) - 1]^{1/c} / -b$	$1/(1+b*(exp(-c*t)))$
Brody	--	--	$[\ln(a-a0.5) - \ln(ab)] / -c$	$(1-b*(exp(-c*t)))$
Bertalanffy	$t = \ln 3b / c$	$y = a*8 / 27$	$\ln[1 - (a0.5/a)^{1/3} / b] / -c$	$(1-b*(exp(-c*t)))^3$
Gompertz	$t = \ln b / c$	$y = a * exp^{-1}$	$\ln[\ln(a0.5/a) / -b] / -c$	$exp(-b*(exp(-c*t)))$

[†]Componentes de las ecuaciones para derivar indicadores de crecimiento: a=peso maduro o asintótico (kg); b=constante de integración; c=tasa de crecimiento ($kg\ kg^{-1}\ mes^{-1}$) ♦ Components of the equations to derive growth indicators: a=mature or asymptotic weight (kg); b=integration constant; c=rate of growth ($kg\ kg^{-1}\ month^{-1}$).

Cuadro 3. Valores de los criterios utilizados para la comparación de modelos.**Table 3. Values of criteria used for comparing models.**

Modelo	VEP [†]	AIC [‡]	EPP [§]	R ² [¶]	R ² _{ajs} [□]	DW ^{††}
Logístico	2333.4	190192	-10.05	80.4	80.3	0.064
Brody	2134.5	189044	-3.30	82.1	82.0	0.071
Bertalanffy	2181.4	189324	-5.07	81.1	81.6	0.069
Gompertz	2214.8	189520	-6.23	81.4	81.3	0.068

[†]VEP = varianza del error de predicción; [‡]AIC = criterio de información Akaike; [§]EPP = error de predicción promedio; [¶]R² = coeficiente de determinación múltiple; [□]R²_{ajs} = coeficiente de determinación ajustado; ^{††}DW = estadístico \diamond [†]VEP = variance of prediction error; [‡]AIC = Akaike information criterion; [§]EPP = average prediction error; [¶]R² = multiple determination coefficient; [□]R²_{ajs} = adjusted determination coefficient; ^{††}DW = Durbin-Watson.

Cuadro 4. Estimaciones de los parámetros de crecimiento, peso adulto o asintótico (kg; a) y tasa de crecimiento relativo al peso adulto (kg kg⁻¹ mes⁻¹; c); así como la constante de integración (b).**Table 4. Estimations of growth parameters, adult or asymptotic weight (kg; a) and growth rate relative to adult weight (kg kg⁻¹ month⁻¹; c); as well as the integration constant (b).**

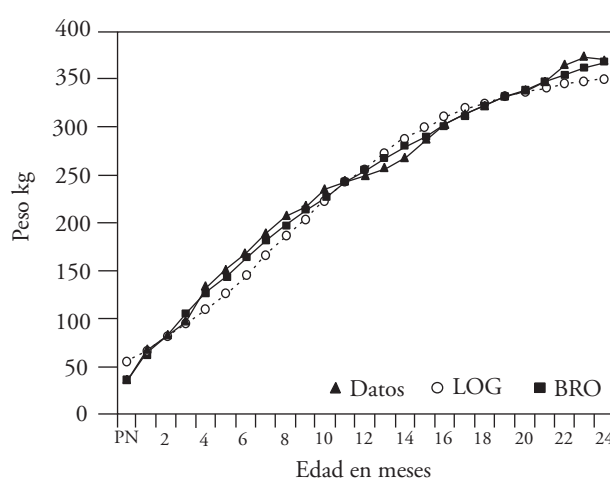
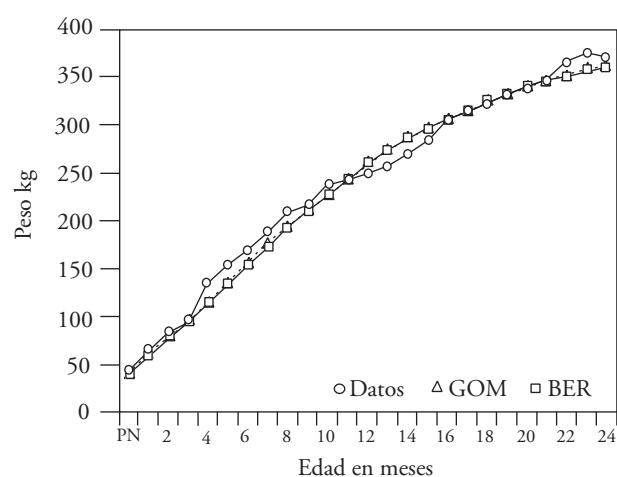
Modelo	a ± ee [†]	b ± ee [†]	c ± ee [†]
Logístico	361.00±1.42	50.53±2.11	0.2211±0.0026
Brody	494.90±6.08	1.5954±0.02	0.0544±0.0012
Bertalanffy	406.60±2.60	1.6126±0.03	0.1109±0.0015
Gompertz	387.70±2.07	8.6734±0.21	0.1393±0.0018

[†] Error estándar \diamond [§]Standard error.

(A50M) and degree of maturity (%) at 18 months of age (PM18) were derived (Table 2); with the exception of the Brody model, which does not allow calculating API and WPI.

RESULTS AND DISCUSSION

The results of the criteria used for comparing the models are presented in Table 3. Based on the estimations of growth parameters (Table 4), the NLMs were adjusted to predict and describe the cattle weight throughout time according to the evaluated models (Figure 1). As a complement, the growth indicators are presented in Table 5 (API, WPI, PM18 and A50M), calculated with the growth parameters presented in Table 4 and based on the equations

**Figura 1. Curvas de crecimiento a través de los cuatro modelos evaluados (LOG = Logístico; GOM = Gompertz; BER = Bertalanffy; BRO = Brody) y los datos observados (Datos).****Figure 1. Growth curves obtained with the four evaluated models (LOG=Logistic; GOM=Gompertz; BER=Bertalanffy; BRO=Brody) and with averages of the data observed (Data).**

Cuadro 5. Valores de los indicadores de crecimiento, edad (meses; EPI) y peso (kg; PPI) al punto de inflexión, edad al 50 % de maduración (meses; E50M) y grado de madurez (%; GM18) a los 18 meses de edad, a partir de los modelos no lineales analizados.

Table 5. Values of growth indicators, age (months; API) and weight (kg; WPI) at point of inflection, age at 50 % of maturation (months; A50M) and degree of maturity (%; PM18) at 18 months of age, obtained from the non-linear models analyzed.

Modelo	EPI	PPI	E50M	GM18
Logístico	7.74	180.50	10.87	90.6
Brody	---	---	11.32	65.2
Bertalanffy	4.21	120.47	8.54	79.8
Gompertz	5.51	142.62	8.13	83.9

descritas en el Cuadro 2. De acuerdo con los R^2 y R^2_{aj} , todos los modelos explicaron alrededor del 80 % de la variabilidad de la información. Además, los valores del estadístico de DW fluctuaron de 0.064 a 0.071, lo cual indica que no hubo problemas de auto correlación en los residuales (Durbin y Watson, 1951). El signo en el error de predicción promedio expresa si la función examinada sobrestima (+) o subestima (-) los datos analizados. De acuerdo con los resultados obtenidos, todos los modelos ajustados tienden a subestimar la información analizada.

El modelo de Brody mostró el mejor ajuste porque tuvo los valores más bajos del criterio AIC (Cuadro 3). Después y con base en el mismo criterio, el modelo de Bertalanffy mostró el mejor ajuste, seguido por el modelo de Gompertz y al final el modelo Logístico. Además, el ajuste con el modelo de Brody describe mejor el comportamiento de los datos originales (Figura 1), porque las estimaciones de EPP y VEP fueron menores (Cuadro 3). Estos resultados se pueden atribuir a que el crecimiento de los bovinos Tropicarne en pastoreo en el trópico no se ajusta al sentido estricto de la curva tipo sigmoidea. La ecuación de Brody describe un crecimiento un poco diferente (Figura 1) porque considera la velocidad de crecimiento proporcional al crecimiento no efectuado todavía ($\text{kg kg}^{-1} \text{mes}^{-1}$). Por consiguiente, la tasa de crecimiento disminuye a medida que aumenta el peso y la edad (Beltran *et al.*, 1992; Kaps *et al.*, 2000; Goyache, 2005). El crecimiento de los bovinos en ambientes tropicales, en particular Tropicarne, se caracteriza por un prolongado periodo predestete de

descrito en Table 2. According to R^2 and R^2_{aj} , all the models explained around 80 % of the variability of the data. In addition, values of the DW statistic fluctuated from 0.064 to 0.071, which indicates that there were no auto-correlation problems for the residuals (Durbin and Watson, 1951). The sign in the average prediction error expresses whether the function examined overestimates (+) or underestimates (-) the data analyzed. Based on the results obtained, all the models adjusted tend to underestimate the data analyzed.

The Brody model showed the best adjustment because it had the lowest values in the AIC criterion (Table 3). Next, based on the same criterion, the Bertalanffy model showed the best adjustment, followed by the Gompertz model and lastly the Logistic model. In addition, the adjustment with the Brody model best describes the behavior of the original data (Figure 1), because the EPP and VEP estimations were the lowest (Table 3). These results can be attributed to the fact that growth of Tropicarne cattle grazing in the tropics does not adjust in the strict sense to a sigmoid type curve. The Brody equation describes a slightly different growth (Figure 1) because it considers the velocity of growth proportional to the growth that has not happened yet ($\text{kg kg}^{-1} \text{month}^{-1}$). Therefore, the rate of growth decreases as the weight and age increases (Beltran *et al.*, 1992; Kapset *et al.*, 2000; Goyache, 2005). Growth of cattle in tropical environments, particularly Tropicarne, is characterized by a prolonged pre-weaning period of seven to nine months of age (Domínguez-Vivero *et al.*, 2003b). Therefore, the point of inflection occurs when the bovine has obtained more than 40 % of the adult weight and the characteristic sigmoid shape of the growth curve for other beef cattle breeds is not observed (Fitzhugh, 1976; Blasco, 1999; Lawrence and Fowler, 2002).

Results from this study with regards to the adjustment attained with different models agree with those obtained by Nunes *et al.* (2000) when evaluating the growth of Guzerat cows from birth to six years of age. Ribeiro (2005) analyzed the growth in eight species of zootechnic interest with nine NLMs: the Logistic model and then the Bertalanffy model had a better adjustment in the species evaluated; but for bovines the Gompertz model was the most adequate to predict growth. Similarly, de Assumpção *et al.* (2005) indicate that the Gompertz and Bertalanffy

siete a nueve meses de edad (Domínguez-Viveros *et al.*, 2003b). Por tanto, el punto de inflexión ocurre cuando el bovino ha obtenido más del 40 % del peso adulto y no se observa la forma sigmoidea característica de otras razas de bovinos para carne (Fitzhugh, 1976; Blasco, 1999; Lawrence y Fowler, 2002).

Los resultados del presente estudio con respecto al ajuste logrado con los diferentes modelos, coincide con los obtenidos por Nunes *et al.* (2000) al evaluar el crecimiento de vacas Guzerat desde el nacimiento hasta los seis años de edad. Ribeiro (2005) analizó el crecimiento en ocho especies de interés zootécnico con nueve MNL: el modelo Logístico y después el de Bertalanffy tuvieron un ajuste mejor en las especies evaluadas; pero para bovinos el modelo de Gompertz fue el más adecuado para predecir el crecimiento. Similarmente, de Assumpção *et al.* (2005) indican que los modelos de Gompertz y Bertalanffy se ajustan mejor para describir el crecimiento de bovinos.

Con respecto a las predicciones del peso a través del tiempo, el peso al nacimiento (PN) fue sobrestimado con 55 kg para el modelo Logístico y superiores a 40 kg para los modelos Gompertz y Bertalanffy. Al respecto, Beltran *et al.* (1992) reportan que el modelo de Brody predice satisfactoriamente el peso adulto en bovinos y sobrestima ligeramente los pesos en edades tempranas (Nunes *et al.*, 2000). Con el modelo de Brody se observaron las mayores estimaciones de PAD y las menores de TM; por el contrario, con el modelo Logístico se obtuvieron las estimaciones menores de PAD y las mayores de TM. Los PAD y las TM tuvieron una relación inversamente proporcional; los modelos con las estimaciones mayores de PAD tuvieron las estimaciones menores de TM (Cuadro 4). Estos resultados indican que los bovinos que alcanzaron más rápidamente el peso adulto, no necesariamente fueron los más pesados. Para bovinos Cebú en Brasil (Orlindo *et al.*, 2000; Régis *et al.*, 2005) las mejores estimaciones de PAD se obtienen con el modelo de Brody, seguido por los modelos Bertalanffy, Gompertz y Logístico. Además, las mejores estimaciones de TM se obtienen con el modelo Logístico, seguido por los modelos de Gompertz, Bertalanffy y Brody. Estos patrones de crecimiento coinciden con las correlaciones fenotípicas negativas entre TM y PAD estimadas por DeNise y Brinks, (1985; Lopez de Torre *et al.*, (1992) con los modelos de Brody y Bertalanffy, con valores entre -0.49 y -0.71 .

models are better adjusted for describing cattle growth.

With regards to predictions of weight throughout time, the weight at birth (WB) was overestimated with 55 kg for the Logistic model and higher than 40 kg for the Gompertz and Bertalanffy models. In this regard, Beltran *et al.* (1992) report that the Brody model satisfactorily predicts the adult weight in bovines and slightly overestimates the weights at early ages (Nunes *et al.*, 2000). With the Brody model, the highest estimations of AW and the lowest of MR were observed; on the contrary, with the Logistic model, the lowest estimations of AW and the highest of MR were obtained. The AWs and MRs had a proportionally inversed relationship; the models with the highest estimations of AW had the lowest estimations of MR (Table 4). These results indicate that the bovines that reached the adult weight more quickly were not necessarily the heaviest. For Cebú cattle in Brazil (Orlindo *et al.*, 2000; Régis *et al.*, 2005), the best estimations for AW were obtained with the Brody model, followed by the Bertalanffy, Gompertz and Logistic model. In addition, the best estimations of MR were obtained with the Logistic model, followed by the Gompertz, Bertalanffy and Brody models. These patterns of growth do agree with negative phenotypic correlations between MR and AW estimated by DeNise and Brinks (1985) and Lopez de Torre *et al.* (1992) with the Brody and Bertalanffy models, with values between -0.49 and -0.71 .

The AW is a difficult parameter to define because the asymptotic approximation to final adult weight is very slow and is reached at a tardy age; also, it depends on the amount of fat tissue, which is very variable during the adult stage of the bovine. The AW, especially in females, affects many aspects of production such as requirements for maintenance, reproduction and discard value; in selection programs, the AW can be kept constant while the previous growth stages are maximized (Blasco, 1999). The MR refers to the speed of growth relative to the adult weight; with high rates of growth the adult weight is reached at a younger age (Nunes *et al.*, 2000; Brown *et al.*, 1976). Genotypes of large frame and high rates of growth are not necessarily more efficient than those of low growth rate; bovines with a higher rate of growth can have higher increases in the costs of production than those with low or moderate

El PAD es un parámetro difícil de definir porque la aproximación asintótica al peso adulto final es muy lenta y se alcanza a una edad tardía; además, depende de la cantidad de tejido graso el cual es muy variable durante el estado adulto del bovino. El PAD, especialmente de las hembras, afecta muchos aspectos de la producción como las necesidades de mantenimiento, reproducción y valor de desecho. En los programas de selección se puede mantener constante el PAD, mientras se maximizan las etapas anteriores de crecimiento (Blasco, 1999). La TM se refiere a la rapidez de crecimiento relativo al peso adulto; con tasas de crecimiento altas se alcanza el peso adulto a menor edad (Nunes *et al.*, 2000; Brown *et al.*, 1976). Los genotipos de talla grande y con tasas de crecimiento altas, no necesariamente son más eficientes que los de tasa de crecimiento baja; los bovinos con tasa de crecimiento más alta pueden tener incrementos mayores en los costos de producción que los de tasa de crecimiento baja o moderada (Akbas *et al.*, 2006). La velocidad de crecimiento es económicamente importante porque se puede usar para determinar el momento óptimo del sacrificio y aprovechar al animal cuando haya alcanzado la velocidad de crecimiento máxima (Agudelo *et al.*, 2008).

El punto de inflexión señala el momento en el cual cesa la aceleración del crecimiento (Brown *et al.*, 1976; Kratochvílová *et al.*, 2002) y el PPI es parte proporcional del PAD (Blasco, 1999; Goyache, 2005). De acuerdo con los resultados del presente estudio (Cuadros 4 y 5), el PPI representó 50.0 % del PAD en el modelo Logístico, 29.6 % en el modelo Bertalanffy y 36.8 % en el modelo Gompertz. El destete en bovinos Tropicarne se realiza alrededor de los ocho meses de edad (Domínguez-Viveros *et al.*, 2003b). La EPI estimada con los modelos de Bertalanffy y Gompertz (3.8 y 4.9 meses) representó 45 a 65 % del periodo predestete, mientras que la estimación obtenida con el modelo Logístico (6.7 meses) representó más del 80 %. Cambios en la velocidad de crecimiento se pueden deber a modificaciones en el régimen alimenticio, disminución de la cantidad y calidad del forraje por cambios en las épocas del año y disminución en la producción de leche de la madre asociado con los cambios nutricionales o ambientales (Menchaca *et al.*, 1996).

El peso a los 18 meses de edad es una característica de importancia económica en el crecimiento posdestete de los bovinos Tropicarne (Domínguez-

growth rates (Akbas *et al.*, 2006). The rate of growth is economically important because it can be used to determine the optimal moment for slaughter and to take advantage of the animal when it has reached the maximum speed of growth (Agudelo *et al.*, 2008).

The point of inflection indicates the moment when acceleration of growth ceases (Brown *et al.*, 1976; Kratochvílová *et al.*, 2002) and the WPI is a proportional part of the AW (Blasco, 1999; Goyache, 2005). According to the results from the present study (Tables 4 and 5), the WPI represented 50.0 % of the AW in the Logistic model, 29.6 % in the Bertalanffy model and 36.8 % in the Gompertz model. Weaning in Tropicarne cattle is carried out around eight months of age (Domínguez-Viveros *et al.*, 2003b). The API estimated with the Bertalanffy and Gompertz models (3.8 and 4.9 months) represented 45 to 65 % of the pre-weaning period, while the estimation obtained with the Logistic model (6.7 months) represented more than 80 %. Changes in the speed of growth can be due to modifications in the dietary regime, a decrease in the quantity and quality of fodder because of changes in seasons and a decrease in milk production by the mother associated to nutritional or environmental changes (Menchaca *et al.*, 1996).

Weight at 18 months of age is a characteristic of economic importance in the post-weaning growth of Tropicarne cattle (Domínguez-Viveros *et al.*, 2003a). When analyzing behavior of maturity (Table 5), with the Brody model cattle had 50 % of maturity at 11.3 months of age, increasing to 65.2 % at 18 months, while with the Bertalanffy model at 8.5 months the cattle had 50 % of maturity, increasing to 79.8 % at 18 months of age. With the Bertalanffy model, an increase of 29.8 % in maturity was calculated to occur in 9.5 months, while with the Brody model it was calculated to be 15.2 % in 7 months. The growth of bovines in the tropic has a lower maturity rate and therefore the age at slaughter is higher, which does agree with the results of this study, given the ranking of the models (Brody – Bertalanffy – Gompertz – Logístico) as a function of the selection criteria described previously, coinciding with the classification of lower (Brody) to higher (Logistic) average monthly rate of maturity. In this regard, Ramírez *et al.* (2009) report a maturity level of 55 to 60 % at 18 months of age, based on the Brody model for six genotypes of females in the Tropic.

Viveros *et al.*, 2003a). Al analizar el comportamiento de la madurez (Cuadro 5), con el modelo de Brody a los 11.3 meses de edad los bovinos tuvieron 50 % de madurez, aumentado a 65.2 % a los 18 meses de edad, mientras que con el modelo de Bertalanffy a los 8.5 meses los bovinos tuvieron 50 % de madurez, aumentando a 79.8 % a los 18 meses de edad. Con el modelo Bertalanffy se calculó un aumento de 29.8 % de madurez en 9.5 meses, mientras que con el modelo Brody fue 15.2 % de madurez en 7 meses. El crecimiento de bovinos en el trópico tiene menor tasa de madurez y por tanto la edad al sacrificio es mayor, lo cual coincide con los resultados del presente estudio, dado que la jerarquización de modelos (Brody - Bertalanffy-Gompertz - Logístico) en función de los criterios de selección descritos previamente, coincidió con la clasificación de menor (Brody) a mayor (Logístico) tasa de maduración media mensual. Al respecto, Ramírez *et al.* (2009) reportan madurez de 55 a 60 % a los 18 meses de edad, con base en el modelo de Brody en seis genotipos de hembras en el trópico.

El parámetro TM puede describir el proceso de maduración de los bovinos, que está definida por la pendiente de la curva; asimismo, puede puntualizar las características de efectos maternos y las relaciones entre tamaño y productividad (DeNise y Brinks, 1985). La mayor diferencia entre modelos, *a priori*, está en el punto de inflexión de la curva, que denota que el crecimiento deja de acelerarse hasta llegar al peso adulto.

CONCLUSIONES

El modelo de Brody, seguido por el modelo Bertalanffy, mostraron un ajuste mejor para describir y predecir el crecimiento de los bovinos Tropicarne. El modelo de Brody permitió describir el crecimiento de bovinos Tropicarne, de acuerdo con las características de crecimiento en el trópico con alimentación basada en pastoreo; presentó las menores tasas de maduración y el tipo de curva no se ajustó al sentido estricto de la curva sigmoidea, característica de otros modelos no lineales ajustados en algunas razas de bovinos para carne.

LITERATURA CITADA

Agudelo G., D. A., M. F. Cerón M., y L. F. Restrepo B. 2008. Modelación de funciones de crecimiento aplicadas a la producción animal. *Rev. Colomb. Cienc. Pecu.* 20:39 – 58.

The MR parameter can describe the process of maturation of bovines, which is defined by the slope of the curve; like wise, it can specify the characteristics of maternal effects and the relationship between size and productivity (DeNise and Brinks, 1985). The greatest difference between models, *a priori*, is in the curve's point of inflection, which denotes that the growth ceases to accelerate until reaching the adult weight.

CONCLUSIONS

The Brody model, followed by the Bertalanffy model, showed a better adjustment to describe and predict growth of Tropicarne bovines. The Brody model allowed describing the growth of Tropicarne cattle, according to the characteristics of growth in the tropic under grazing conditions; it presented the lowest maturation rates and the type of curve did not adjust in a strict sense to the sigmoid shape curve, typical of other non-linear models adjusted in some beef cattle breeds.

—End of the English version—

-----*-----

- Akbas, Y., A. Alcicek, A. Önenc, and M. Güngör. 2006. Growth curve analysis for body weight and dry matter in Friesian, Limousin x Friesian and Piemontese x Friesian cattle. *Arch. Tierz. Dummerstorf* 49:329 – 339.
- Beltran, J. J., W. T. Butts Jr, T. A. Olson, and M. Koger. 1992. Growth patterns of two lines of Angus cattle selected using predicted growth parameters. *J. Anim. Sci.* 70:734 – 741.
- Blasco, A. 1999. La descripción del crecimiento. Informe técnico ocasional N°6. Departamento de ciencia animal. Universidad Politécnica de Valencia. www.dcam.upv.es/dcia/Download/ITO6.pdf (Consultado: agosto del 2011). 22 p.
- Brown, J. E., H. A. Fitzhugh Jr, and T. C. Cartwright. 1976. A comparison of nonlinear models for describing weight – age relationships in cattle. *J. Anim. Sci.* 42:810 – 818.
- de Assumpção M., A. R., J. Augusto M., F. Fonseca S., y L. Henrique A. 2005. Curva de crecimiento de novillos Hereford: heterocedasticidad y residuos autorregresivos. *Ciênc. Rural Sta. Maria* 35:422 – 427.
- DeNise K., R. S., and J. S. Brinks. 1985. Genetic and environmental aspects of the growth curve parameters in beef cows. *J. Anim. Sci.* 61:1431 – 1440.
- Domínguez-Viveros, J., R. Núñez-Domínguez, R. Ramírez-Valverde, y A. Ruíz-Flores. 2003a. Evaluación genética de variables de crecimiento en ganado bovino Tropicarne: I. Selección de modelos. *Agrociencia* 37: 323 – 335.

- Domínguez-Viveros, J., R. Núñez-Domínguez, R. Ramírez-Valverde, y A. Ruíz-Flores. 2003b. Influencias ambientales e índice de constancia para características de crecimiento en bovinos Tropicarne. *Téc. Pecu. Méx.* 41:1-18.
- Durbin, J., and G. S. Watson. 1951. Testing for serial correlation in least - squares regression. *Biometrika* 38: 159 - 171.
- Fitzhugh Jr, H. A. 1976. Analysis of growth curves and strategies for altering their shape. *J. Anim. Sci.* 42:1036 - 1051.
- Goyache F., M. 2005. Crecimiento, consumo y medidas corporales. *In: Estandarización de las metodologías para evaluar la calidad del producto (animal vivo, canal carne y grasa) en los rumiantes.* V. Cañeque y C. Dañudo (eds.). Monografías INIA - Serieganadera, Madrid, España. 11 - 23 p.
- Kaps, M., W. O. Herring, and W. R. Lamberson. 2000. Genetic and environmental parameters for traits derived from the Brody growth curve and their relationships with weaning weight in Angus cattle. *J. Anim. Sci.* 78:1436 - 1442.
- Kratochvílová, M., L. Hyánková, H. Knizetová, J. Fiedler, and F. Urban. 2002. Growth curve analysis in cattle from early maturity and mature body size viewpoints. *Czech J. Anim. Sci.* 47:125 - 132.
- Lawrence T., L. J., and V. R. Fowler. 2002. Growth of Farm Animal. 2nd edition. CAB International, London U. K. 347 p.
- Lopez de Torre, G., J. J. Candotti, A. Reverter, M. M. Bellido, P. Vasco, L. J. Garcia, and J. S. Brinks. 1992. Effects of growth curve parameters on cow efficiency. *J. Anim. Sci.* 70:2668 - 2672.
- Mejía-Bautista, G. T., J. G. Magaña, J. C. Segura-Correa, R. Delgado and R. J. Estrada-León. 2010. Comportamiento reproductivo y productivo de vacas *Bos indicus*, *Bos Taurus* y sus cruces en un sistema de producción vaca:cría en Yucatán, México. *Trop. Subtrop. Agroec.* 12: 289-301.
- Menchaca, M. A., C. C. Chase Jr, T. A. Olson, and A. C. Hammond. 1996. Evaluation of growth curves of Brahman cattle of various frame sizes. *J. Anim. Sci.* 74:2140 - 2151.
- Morris, C. A., K. R. Jones, J. A. Wilson and T. G. Watson. 1992. Comparison of the Brahman and Friesian breeds as sires for beef production in New Zealand. *New Zealand J. Agric. Res.* 35:277-286.
- Motulsky, H. J., and A. Christopoulos. 2003. Fitting models to biological data using linear and nonlinear regression. A practical guide to curve fitting. Graph Pad Software Inc. San Diego CA, USA. 352 p
- Noguera, R. R., R. L. Pereira, y C. E. Solarte. 2008. Comparación de modelos no lineales para describir curvas de crecimiento en cuyes (*Cavia porcellus*) desde el nacimiento hasta la edad al sacrificio. *Livest. Res. Rural Develop.* 5:1 - 18.
- Nunes de O., H., R. Barbosa L., y C. Silva P. 2000. Comparação de modelos não-lineares para descrever o crescimento de fêmeas da raça Guzerá. *Pesq. Agrop. Bras., Brasília* 35:1843 - 1851.
- Orlindo T., L., C. Boin, R. Fernandes N., P. Roberto L. 2000. Estudo da curva de crescimento de animais da raça Guzerá e seus cruzamentos alimentados a pastos, com e sem suplementação. 2. Avaliação dos parâmetros da curva de crescimento. *Rev. Bras. Zootec.* 29:1578 - 1587.
- Owens, F. N., P. Dubeski, and C. F. Hanson. 1993. Factors that alter the growth and development of ruminants. *J. Anim. Sci.* 71:3138 - 3150.
- Plasse, D. 1978. Aspectos de crecimiento del *Bos indicus* en el trópico Americano. *World Rev. Anim. Prod.* 4:29 - 48.
- Quintero V., J., J. Serna G., y M. Cerón-Muñoz. 2007. Modelos mixtos no lineales en curvas de lactancia de búfalas en un sistema de producción orgánica en el Magdalena Medio Antioqueño (Colombia). *Livest. Res. Rural Develop.* 4:52 - 65.
- Ramírez E., J., M. F. Cerón M., C. Herrera A., D. Vergara O., M. Arboleda E., y F. Restrepo L. 2009. Crecimiento de hembras cruzadas en el trópico colombiano. *Rev. Colomb. Cienc. Pecu.* 22:642 - 647.
- Régis S., K., S. B. Paes B., L. H. Albuquerque B., y E. de Souza S. 2005. Estimativas de parâmetros de crescimento de bovinos Zebu, criados no Estado de Pernambuco. *Rev. Bras. Zootec.* 34:2262 - 2279.
- Ribeiro de F., A. 2005. Curvas de crescimento em Produção Animal. *Rev. Bras. Zootec.* 34:786 - 795.
- Ruiz-Flores, A., R. Núñez-Domínguez, R. Ramírez-Valverde, J. Domínguez-Viveros, M. Mendoza-Domínguez, y E. Martínez-Cuevas. 2006. Niveles y efectos de la consanguinidad en variables de crecimiento y reproductivas en bovinos Tropicarne y Suizo Europeo. *Agrociencia* 40:289 - 301.
- SAGAR. 1996. Reglamento Técnico de la Asociación Mexicana de Criadores de Ganado Tropicarne. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. México, D.F. 24 p.
- SAS. 2001. SAS User's Guide: Statistics (version 9.0) Cary NC, USA: SAS Inst. Inc.
- Thornley, J. H. M., and J. France. 2007. Mathematical Models in Agriculture, Quantitative Methods for Plant, Animal and Ecological Sciences. Second edition. CAB International, London U. K. 435 p.