Modelos para estimar la dinámica de crecimiento de *Pennisetum purpureum* vc. Cuba CT-169

Lourdes Rodríguez[1], Verena Torres[1], R.O. Martínez[1], O. Jay[2], Aida C. Noda[1] y Magaly Herrera[1]
[1]*Instituto de Ciencia Animal, Apartado Postal 24, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba*
[2]*Centro Universitario de Guantánamo, Carretera a Santiago de Cuba, km. 2,5. Guantánamo, Cuba*
Correo electrónico: lrodriguez@ica.co.cu

Se utilizaron diferentes modelos de regresión para estudiar la dinámica de crecimiento del *Pennisetum purpureum* vvc. Cuba CT-169 mediante las variables agronómicas rendimiento acumulado de materia seca, porcentaje de hojas y altura de la planta. Se utilizó información de experimentos realizados por el Departamento de Pastos del Instituto de Ciencia Animal. Cada 14 d, se tomaron datos de la acumulación de biomasa del pasto a doce edades de corte durante el período lluvioso, y a diez edades en el poco lluvioso, sin aplicar fertilización ni riego. Se ajustaron tres modelos lineales (simple, cuadrático y cúbico) y tres no lineales (logístico, Gompertz y exponencial). Se aplicaron cuatro criterios estadísticos para seleccionar los modelos de mejor bondad de ajuste. Los modelos propuestos explicaron la mayor parte de la variabilidad total, con coeficientes de determinación superiores a 89 %, varianza residual mínima, parámetros significativos y valores adecuados para el resto de los criterios evaluados. Los modelos de mejor ajuste en el período lluvioso fueron el de Gompertz, para el rendimiento acumulado de materia seca y la altura, y el exponencial para el porcentaje de hojas. En el poco lluvioso, el de mejor ajuste fue el logístico para el rendimiento acumulado de materia seca y la altura; y el lineal simple para el porcentaje de hojas. En las condiciones de este estudio, se recomienda cortar el forraje a la edad de 70 y 106 d en los períodos lluvioso y poco lluvioso, respectivamente. Se sugiere profundizar en el comportamiento de los indicadores bromatológicos y validar los modelos propuestos en investigaciones futuras para simular el comportamiento de este pasto en diferentes condiciones.

Palabras clave: *modelos de regresión, dinámica de crecimiento, Cuba CT-169, bondad de ajuste.*

Para la producción de forraje se han utilizado en Cuba diversas especies y variedades de hábito de crecimiento rastrero o erecto (Herrera y Ramos 2006). Para la producción de forrajes, en gramíneas rastreras y de porte bajo, Del Pozo (1998) analizó el crecimiento del pasto estrella (*C. nlemfuensis*) en condiciones de corte y pastoreo, con adición de fertilizante nitrogenado y sin él. En esta misma variedad, Torres *et al*. (1999) estimaron un modelo para describir el crecimiento en condiciones de pastoreo, pero en función del tiempo de reposo. Estos autores recomendaron estudios similares en otras especies tropicales con hábito de crecimiento rastrero o erecto.

El pasto Cuba CT-169 es un clon obtenido en el Instituto de Ciencia Animal, a partir del mejoramiento genético del *Pennisetum purpureum*, mediante la utilización del cultivo de tejidos (Martínez *et al*. 1986, citado por Herrera y Martínez 2006). Por sus posibilidades de utilización como forraje (Martínez 2007) se recomienda para la alimentación animal.

El CT - 169 se caracteriza por tallos robustos y entrenudos largos, con hojas más largas y anchas que el king grass. La proporción de hojas es superior en los primeros 100 d de edad, por lo que el contenido de proteína bruta de la biomasa es superior en 3-5 %. El rendimiento promedio anual de este pasto es de 20 t MS, 10 % más que el king grass. Esto le confiere mejores características como planta forrajera (Martínez *et al*. 2009).

En estos momentos, el CT - 169 se encuentra en fase de introducción en diferentes regiones ganaderas de Cuba (Ramírez 2010). El objetivo de su incorporación es la producción de forraje de mejor calidad (Herrera y Martínez 2006), por lo que resulta de gran interés conocer su dinámica de crecimiento en diferentes condiciones edafoclimáticas, con la finalidad de establecer mecanismos que ayuden a su mejor utilización y manejo.

Los modelos matemáticos aplicados al crecimiento de las plantas permiten estimar o predecir su comportamiento temporal en diferentes condiciones (Thornley y France 2007). Para su correcta utilización se deben tener en cuenta tres aspectos fundamentales: a) bondad del ajuste de los datos, b) capacidad de interpretación biológica, c) exigencias computacionales (Chacín 1998). En la actualidad, este último no constituye una limitación, debido al desarrollo alcanzado por las ciencias computacionales.

Una función de crecimiento general, que relacione determinadas características del pasto con el tiempo, puede expresarse como $W=F(t)$, donde:

F (t) denota una relación funcional y t es la variable independiente medida en el tiempo.

El objetivo de este trabajo fue modelar la dinámica de crecimiento del pasto Cuba CT-169 en los períodos lluvioso y poco lluvioso, según sus características agronómicas, rendimiento acumulado de materia seca, altura de la planta y porcentaje de hojas.

Materiales y Métodos

Se utilizó información de investigaciones

desarrolladas durante un año por el Departamento de Pastos del Instituto de Ciencia Animal. Esta institución está ubicada en el municipio San José de las Lajas, provincia Mayabeque, entre 22º 53´ LN y 82º 02´ LW, a 92 msnm. El promedio de precipitaciones de 2002 a 2009 fue de 1071 mm en el período lluvioso, y de 200 mm en el poco lluvioso (García *et al*. 2010).

Cada 14 d (14, 28, 42, 56, 70, 84, 98, 112, 126, 140, 154, 168) se tomaron datos de acumulación de biomasa del pasto Cuba CT-169 a doce edades de corte durante el período lluvioso, y a diez edades durante el poco lluvioso. Las relaciones se establecieron entre la edad de corte y el valor de las mediciones en cada corte para las variables rendimiento acumulado de materia seca (RMSA), altura de la planta y porcentaje de hojas.

El experimento se realizó en un suelo ferralítico rojo, sin aplicar riego ni fertilización, en doce surcos, de 40 m de largo y uno de ancho. Cada 14 d se cortaron seis parcelas, de 5 m de largo por 1 m de ancho. Las parcelas constituyeron seis repeticiones de cada edad. La altura de corte del pasto se realizó a 10 cm del suelo.

Se evaluaron seis modelos de regresión para seleccionar el de mejor ajuste en cada una de las variables estudiadas, a medida que aumentó la edad del pasto. Los modelos evaluados fueron los siguientes:

$$\text{Lineales}\begin{cases} W(t)= \beta_0+\beta_1 t & \text{simple} \\ W(t)= \beta_0+\beta_1 t+\beta_2 t^2 & \text{cuadrático} \\ W(t)= \beta_0+\beta_1 t^2+\beta_2 t^2+\beta_3 t^3 & \text{cúbico} \end{cases}$$

$$NoLineales\begin{cases} W(t)= \dfrac{\beta_1}{1+\beta_2 e^{-\beta_3 t}} & logístico \\ W(t)= \beta_1 e^{-\beta_2 e^{-\beta_3 t}} & Gompertz \\ W(t)= \beta_1 + \beta_2 e^{-\beta_3 t} & exponencial \end{cases}$$

donde:

W(t) = variable que representa el crecimiento o desarrollo

βi = parámetros de los modelos i= 1, 2, 3

t = tiempo (d)

La selección del modelo de mejor bondad de ajuste para cada variable se realizó a partir de cuatro criterios estadísticos informados por Chacín (2000), Ortiz (2000) y Guerra *et al*. (2003). Se analizaron los siguientes criterios de selección: significación de los parámetros, coeficiente de determinación (R^2), cuadrado medio residual (CMR) y análisis de los residuos (Durbin-Watson).

Se calculó la primera y segunda derivada de los modelos de mejor ajuste, en las variables rendimiento acumulado de materia seca y altura de la planta para determinar la máxima velocidad de crecimiento y edad a la que se alcanza el punto de inflexión. La información se procesó en los programas estadísticos InfoStat (Di Rienzo *et al*. 2001) y Statgraphics Plus (Anon 1995).

Resultados y Discusión

En la tabla 1 se muestra el resultado de los modelos que presentaron mejor ajuste para las variables estudiadas, y los cuatro criterios de comparación considerados para su selección.

Para los períodos lluvioso y poco lluvioso, se ajustaron modelos diferentes. Los modelos clásicos de crecimiento, Gompertz para el período lluvioso y logístico para el poco lluvioso, fueron los de mejor ajuste para las variables acumulación de materia seca y altura de la planta. Este comportamiento es lógico, si se considera que estos modelos se caracterizan por formar una curva sigmoidea que se ajusta al crecimiento típico de las plantas (Pérez *et al*. 2004 y Thornley y France 2007).

Estos modelos se han aplicado en diferentes campos y constituyen un instrumento común en el estudio de sistemas con diversas características (Torres *et al*. 2009). En el campo de la ciencia animal, estas funciones se encuentran entre las más utilizadas para describir el crecimiento de los individuos (Cayré *et al*. 2007, Casas *et al*. 2010 y Martínez *et al*. 2010). Además, han posibilitado la identificación de los parámetros productivos de interés económico para la implementación de programas de mejoramiento zootécnico.

Estudios realizados por García *et al*. (2007) y Rodríguez *et al*. (2007) confirmaron que los modelos de crecimiento logístico y de Gompertz presentaron buen ajuste con respecto a los datos experimentales de rendimiento y altura de otras especies y variedades de pastos, como *Panicum maximun* vc. Mombaza y *Pennisetum purpureum* vc. Cuba CT-115. Estas variedades se caracterizan por un ciclo de crecimiento largo (más de 160 d).

La variable porcentaje de hojas no respondió a la curva sigmoidea. Para el período lluvioso, el modelo exponencial fue el de mejores resultados, y para el poco lluvioso el lineal simple.

Las figuras 1, 2, 3, 4, 5 y 6 muestran el ajuste de los modelos seleccionados a los datos experimentales de las variables acumulación de materia seca, altura de la planta y porcentaje de hojas en ambos períodos del año.

Generalmente, en ambos períodos del año, y para todas las variables estudiadas, los parámetros fueron significativos. La variabilidad explicada por los modelos fue alta y similar, con coeficientes de determinación superiores a 89 %. Esto indica la precisión de los modelos propuestos para explicar el proceso biológico.

Los datos fueron más variables (CMR) en el período lluvioso con respecto al poco lluvioso para la acumulación de materia seca y para la altura de la planta, respectivamente (tabla 1). Este comportamiento puede obedecer a que en el período lluvioso existen temperaturas más altas, mayor humedad del suelo y duración del día, lo que propicia que las plantas

Tabla1. Modelos de mejor bondad de ajuste entre las variables rendimiento acumulado de materia seca, altura de la planta y porcentaje de hojas con la edad de corte del pasto.

Período	Variables	Modelo de mejor ajuste	Criterios estadísticos			
			Significación de los parámetros	R^2 (%)	CMR	Durbin Watson
Lluvioso	RMSA (t ha^{-1})	Gompertz	β_1 P<0.001 β_2 P<0.05 β_3 P<0.001	97.50	5.80	1.92
	Altura (cm)	Gompertz	β_1 P<0.001 β_2 P<0.001 β_3 P<0.001	98.65	118.00	2.32
	Hojas (%)	Exponencial	β_1 P<0.001 β_2 P<0.001 β_3 P<0.001	98.69	5.38	2.45
Poco Lluvioso	RMSA (t ha^{-1})	Logístico	β_1 P<0.05 β_2 P<0.01 β_3 P<0.01	98.00	00.15	1.98
	Altura (cm)	Logístico	β_1 P<0.001 β_2 P<0.001 β_3 P<0.001	98.00	37.58	2.99
	Hojas (%)	Lineal simple	β_0 P<0.001 β_1 P<0.001	89.00	24.95	1.51

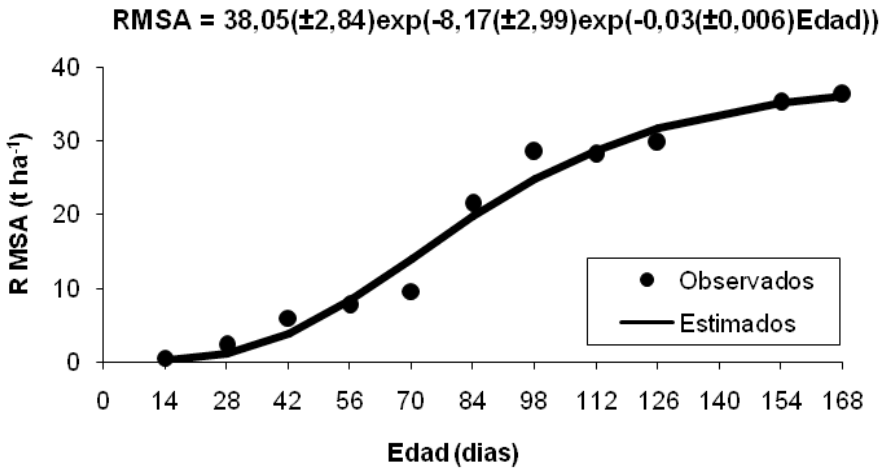

Figura.1 Modelo Gompertz ajustado al rendimiento acumulado de materia seca en el período lluvioso

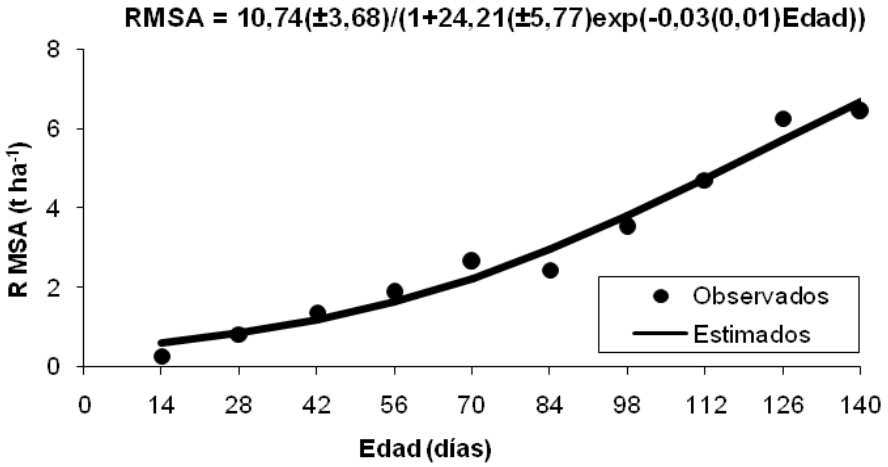

Figura 2. Modelo logístico ajustado al rendimiento acumulado de materia seca en el período poco lluvioso.

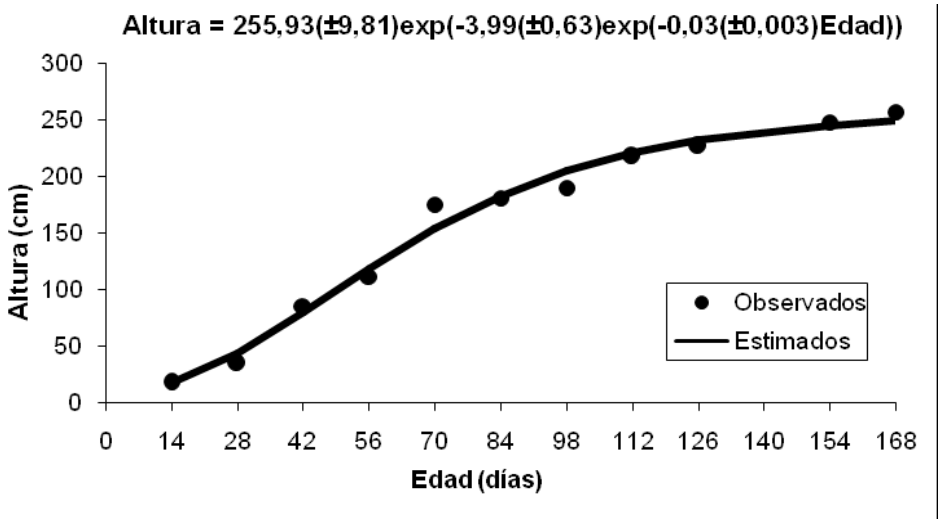

Figura 3. Modelo Gompertz ajustado a la altura de la planta en el período lluvioso.

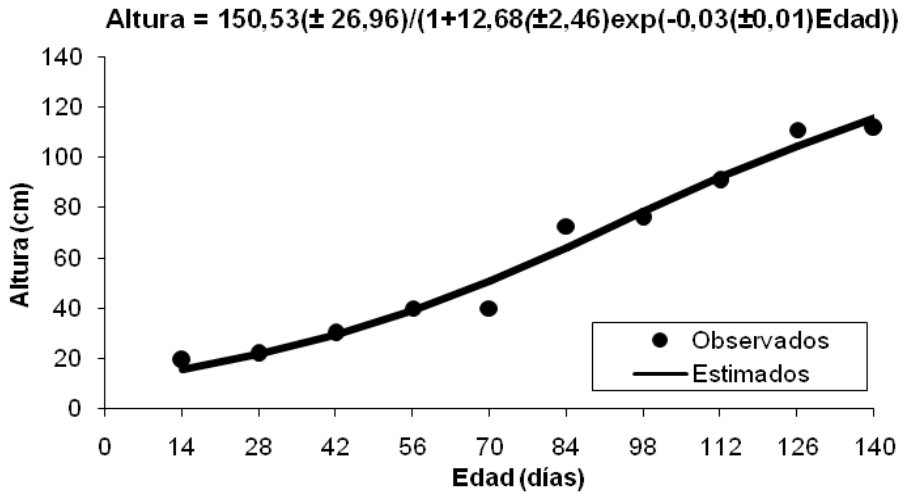

Figura 4. Modelo logístico ajustado a la altura de la planta en el período poco lluvioso.

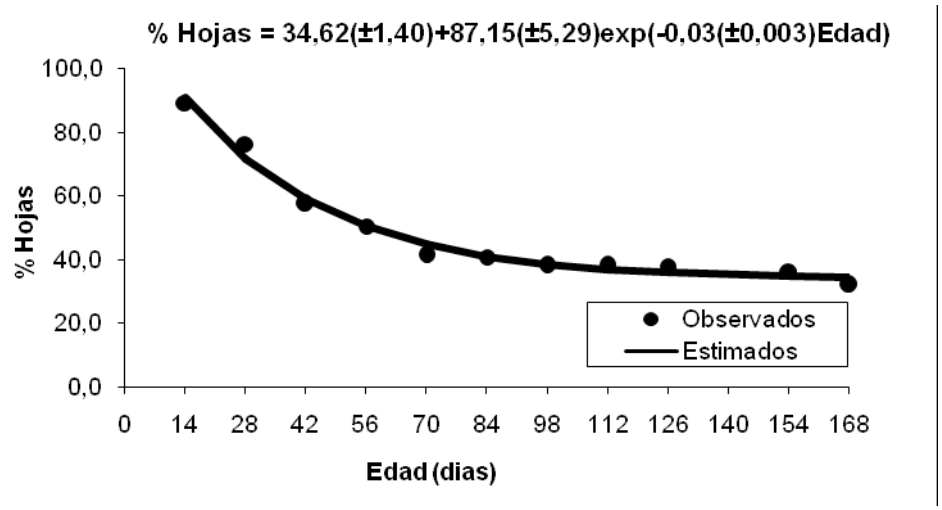

Figura 5. Modelo exponencial ajustado al porcentaje de hojas en el período lluvioso

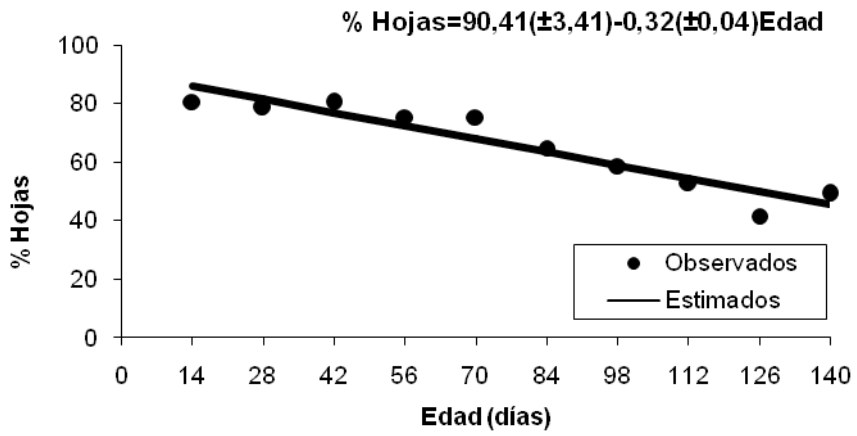

Figura 6. Modelo lineal simple ajustado al porcentaje de hojas en el período poco lluvioso.

acumulen mayor cantidad de biomasa, y expresen su potencial de crecimiento y variabilidad de forma más dinámica.

Según del Pozo (1998), el crecimiento y calidad de los pastos puede variar considerablemente de acuerdo con el manejo a que se someten, con efectos favorables o no según la especie de planta y las condiciones edafoclimáticas. Otros factores como la edad, altura de corte y fertilización mineral se encuentran entre los componentes que más determinan en las condiciones del trópico.

Para la variable porcentaje de hojas, esta situación fue diferente. La dispersión de los datos fue menor en el período lluvioso, y mayor en el poco lluvioso. Esto se explica porque biológicamente existe una relación inversa entre el desarrollo y crecimiento de la planta y su porcentaje de hojas. En el período poco lluvioso este indicador es mayor y más variable.

En el lluvioso, la proporción de hojas disminuyó de forma exponencial con la edad del pasto, con una gran variabilidad entre edades de corte (figura 5). Por el contrario, en el poco lluvioso, la proporción de hojas también se redujo, pero de forma constante, a un ritmo de 0.32 unidades porcentuales por día (figura 6).

En todos los casos, el test de Durbin-Watson evidenció ausencia de correlación de los errores (Montgomery *et al*. 2005), a pesar de que las observaciones se ordenaron en función del tiempo (Abreu *et al*. 2004).

La tabla 2 muestra las tasas de variación del crecimiento y la edad en que se alcanzó el punto de inflexión de este clon en ambos períodos del año.

En el período lluvioso este cultivar experimenta mayor velocidad de crecimiento, expresada en las variables rendimiento de materia seca y altura. Alcanzó el punto de inflexión para el RMSA a los 70 d, con tasa de crecimiento de 0.42 t $ha^{-1}d^{-1}$, y para la altura a los 46 d con 1.92 cm d^{-1}.

Estos resultados explican el porqué en el período lluvioso se recomiendan frecuencias de corte del forraje de 60 a 70 d de edad, lo que coincide con mayor calidad del producto. Esto corrobora lo informado por Martínez *et al*. (2009) para este cultivar.

En Costa Rica, Chacón y Vargas (2009) encontraron similares resultados en king grass, al estudiar tres edades de corte (60, 75, 90). Aunque estos autores no modelan la dinámica de crecimiento, recomiendan que la edad de corte óptima para la cosecha del king grass debe ser de 60 d, momento en que se constató la mejor calidad del pasto.

Según Machado *et al*. (1983), en la mayoría de los ensayos con gramíneas tropicales, las frecuencias de corte más prolongadas, sin que se perjudique la calidad del pasto, son las más favorables y proporcionan mayor estabilidad al pastizal.

En el período poco lluvioso se observaron tasas de crecimiento muy pequeñas, expresadas en rendimiento y altura. En las condiciones de este experimento, con las tasas de crecimiento obtenidas (0.08 t $ha^{-1}d^{-1}$), el punto de inflexión ocurre a los 106 d. Esto corrobora las dificultades que se presentan en la producción de forraje, que están motivadas por bajas temperaturas, poca humedad en el suelo y duración del día.

Se concluye que los modelos ajustados explicaron la mayor parte de la variabilidad total, con coeficientes

Tabla 2. Tasa de variación en el tiempo de las variables rendimiento de materia seca acumulado y altura de la planta.

Período	Tasa de máxima variación del crecimiento		Edad al punto de inflexión	
	RMSA (t $ha^{-1}d^{-1}$)	Altura (cm d^{-1})	RMSA (d)	Altura (d)
Lluvioso	0.42	1.92	70.0	46.0
P. Lluvioso	0.08	1.13	106.0	84.6

de determinación superiores a 89 %, varianza residual mínima y parámetros significativos. El modelo Gompertz para el período lluvioso, y el logístico para el poco lluvioso fueron los que explicaron mejor la dinámica de crecimiento del Cuba CT-169 a través de las variables acumulación de materia seca y altura de la planta. Para la variable porcentaje de hojas, el mejor modelo fue el exponencial para el período lluvioso, y el lineal simple para el poco lluvioso.

En las condiciones de estudio, se recomienda cortar el forraje a la edad de 70 y 106 d en los períodos lluvioso y poco lluvioso, respectivamente. Se sugiere profundizar en el comportamiento de los indicadores bromatológicos y validar los modelos propuestos en investigaciones futuras para simular el comportamiento de este pasto en diferentes condiciones.

Referencias

Abreu, U.G., Cobuci, J.A., da Silva, M.V.G.V. & Sereno, J.R.B. 2004. Use of non lineal models for the adjustment of growth curve of bovine pantaneiros. Rev. Archivos de Zootecnia 53:370

Anon 1995. Software estadístico Statgraphics Plus, versión 5.1 sobre Windows.

Casas, G., Rodríguez, D. & Afanador, G. 2010. Propiedades matemáticas del modelo de Gompertz y su aplicación al crecimiento de los cerdos. Disponible: http://rccp.udea.edu.co/index.php/ojs/article/view/455/561. Consultado: 3 de enero de 2011

Cayré, M.E., Vignolo, G.M. & Garro, O. A. 2007. Selección de un modelo primario para describir la curva de crecimiento de bacterias lácticas y *Brochothrix thermosphacta* sobre emulsiones cárnicas cocidas. Disponible: http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642007000300004&script=sci_arttext. Consultado: 3 de enero de 2011

Chacín, F. 1998. Análisis de regresión y superficie de respuesta. Ed. R. Cásares, A. Segovia, D. Gaskin. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. 111 pp.

Chacín, F. 2000. Diseño y análisis de experimento I. Ed. Universidad Central de Venezuela. Caracas. Venezuela. p. 338

Chacón, P. A. &Vargas, C. F. 2009. Digestibilidad y calidad del *Pennisetum purpureum* cv. king grass a tres edades de rebrote. Nota Técnica. Agronomía Mesoamericana 20:399

Del Pozo, P.P. 1998. Análisis del crecimiento del pasto estrella (*C. nlemfuensis*) bajo condiciones de corte y pastoreo. Tesis Dr. Instituto de Ciencia Animal. La Habana, Cuba

Di Rienzo, J.A., Balzarini, M., Casanoves, F., González, L., Tablada, M., Guzmán, W. & Robledo, C.W. 2001. Software estadístico InfoStat. Estadística y Biometría. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba

García, M., Herrera, R.S., Cruz., A.M. & Romero, A. 2010. ¿Conoce usted el régimen de precipitaciones en dos áreas del Instituto de Ciencia Animal? XVI Forum de Ciencia y Técnica. Cuarta Edición. Instituto de Ciencia Animal. Cuba. p. 5

García, C.R., Martínez, R.O., Tuero, R., Cruz, A.M., Romero, A., Estanquero, L. & Noda, 2007. Caracterización de la dinámica de crecimiento y calidad del *Panicum maximum* vc. Mombaza en un suelo ferralítico de provincia La Habana. II Congreso de Producción Animal Tropical. . Eds. M.F. Díaz, R.S. Herrera, T. Ruíz. Cuba. p. 231

Guerra, C.W., Cabrera, A. & Fernández, L. 2003. Criterios para la selección de modelos estadísticos en la investigación científica. Rev. Cubana Cienc. Agríc. 37:3

Herrera, R.S. & Martínez, R.O. 2006. Mejoramiento genético por vías no clásicas. En: *Pennisetum purpureum* para la ganadería tropical. Eds. R.S. Herrera, G. Febles, G. Crespo. Ed. Instituto de Ciencia Animal. La Habana. Cuba. p. 25

Herrera, R.S. & Ramos, N. 2006. Factores que influyen en la producción de biomasa y la calidad. En: *Pennisetum purpureum* para la ganadería tropical. Eds. R.S. Herrera, G. Febles, G. Crespo. Instituto de Ciencia Animal. La Habana. Cuba. 79 pp.

Machado, R., Caceres, O. & Miret, R. 1983. *Pennisetun purpureum* cvs, Taiwan A-144, A-146, A-148, y 801-4. Rev. Pastos y Forrajes 6:143

Martínez, R.O. 2007. Características de los clones de hierba elefante Cuba CT-115, Cuba CT-169 y Cuba OM-22 (*Pennisetum sp.*) liberados por el Instituto de Ciencia Animal. Eds. M.F. Díaz, R.S. Herrera, T. Ruíz. Cuba. 208 pp.

Martínez, R.O., Herrera, R.S., Tuero, R. & Padilla, C.R. 2009. Hierba elefante. Variedades Cuba CT-115, Cuba CT- 169 y Cuba OM-22 (*Pennisetum Sp*). Rev. ACPA. 2:44

Martínez, C. A., Rodríguez, A.P., Jiménez, A. & Manrique, C. 2010. Descripción matemática de la función Gompertz aplicada al crecimiento de animales. Disponible: http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/remevez/article/view/16169 . Consultado: 10 de enero de 2010

Montgomery, D.C., Peck, E.A. & Vining, G.G. 2005. Otros temas acerca del uso del análisis de regresión. En: Introducción al análisis de regresión lineal. Tercera edición. Ed. Continental. México. Pp. 441-446

Ortiz, R.J. 2000. Modelación y simulación matemática del reciclaje de N, P y K en sistemas de pastoreo vacuno. Tesis Dr. Cs. Instituto de Ciencia Animal. La Habana, Cuba

Pérez, J.A., García, E., Enríquez, J.F., Quero. A.R., Pérez, J. & Hernández, A. 2004. A growth analisys, specific leaf area and leaf nitrogen concentration in “mulato” grass (*Brachiaria híbrido*, cv). Rev. Téc. Pec. Méx. 42:447

Ramírez, J.L. 2010. Rendimiento y calidad de cinco gramíneas en el Valle del Cauto. Tesis Dr. Instituto de Ciencia Animal, La Habana, Cuba.

Rodríguez, L., Torres, V., Martínez, O., Herrera, M., Noda, A. & Jay, O. 2007. Modelación matemática de la dinámica de producción del pasto *Pennisetum purpureum* Cuba CT-115 en época de lluvia. II Congreso de Producción Animal Tropical. I Taller de Informática y Bioestadística Aplicada a las Ciencias Agropecuarias. Eds. M.F. Díaz, R.S. Herrera, T. Ruíz. 368 pp.

Thornley, J.H.M. & France, J. 2007. Growth functions. En: Mathematical Models in Agriculture. Quantitative methods for the plant, animal and ecological sciences. 2nd Ed. Cromwell Press, Trowbridge. Pp. 136-171

Torres, V., Lazo, J., Ruiz, T.E. & Noda, A. 1999. Empleo de la modelación matemática en el estudio del pasto *C. nlemfuensis*. Rev. Cubana de Cienc. Agríc. 33:363

Torres, V., Sampaio, I. & Fundora, O. 2009. Modelo estocástico del comportamiento productivo en las etapas crecimiento de búfalos de agua en Cuba. Rev. Cubana Cienc. Agríc. 43:113

Recibido: 20 de junio de 2011