

Utilización de la metodología de superficie de respuesta para modelar los cambios en la productividad de *Cynodon nlemfuensis* Vanderyst**Utilization of the response surface methodology to model changes in the productivity of *Cynodon nlemfuensis* Vanderyst**Liansy Fernández-Domínguez¹ <https://orcid.org/0000-0003-4752-6416>, Pedro Pablo del Pozo-Rodríguez² <https://orcid.org/0000-0002-7620-4910>, Lucía Fernández-Chuairé¹ <https://orcid.org/0000-0003-2439-1176> y Rafael Segundo Herrera-García³ <https://orcid.org/0000-0003-1424-6311>¹Universidad Agraria de La Habana Fructuoso Rodríguez Pérez. Carretera Tapaste, km 22 ½. San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba. ²Ministerio de Educación Superior. Ave. 23 y F Vedado, La Habana, Cuba. ³Instituto de Ciencia Animal. Apartado Postal 24, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba. Correo electrónico: liansy@unah.edu.cu**Resumen**

Objetivo: Utilizar la metodología de superficie de respuesta para modelar los cambios de productividad de *Cynodon nlemfuensis* Vanderyst, sometido a diferentes dosis de fertilización y edades de rebrote, en condiciones de corte, en ambos periodos del año.

Materiales y Métodos: Los datos se tomaron de experimentos desarrollados en el Instituto de Ciencia Animal en un diseño de parcelas divididas. La parcela principal fue la dosis de aplicación de nitrógeno (0,200 y 400 kg de N/ha/año). Mientras, en las subparcelas se ubicaron las 12 edades de rebrote (desde 1 hasta 12 semanas). Se analizaron como variables respuestas el rendimiento de masa seca total, el rendimiento de masa seca de las hojas y el rendimiento de masa seca de los tallos. Los datos se ajustaron a modelos de regresión múltiple y superficie de respuesta para cada variable. Se procesaron estadísticamente mediante los paquetes STATGRAPHICS® Centurion XVI y GeoGebra.

Resultados: Las variables rendimiento de materia seca total, rendimiento de masa seca de las hojas y rendimiento de masa seca de los tallos, para los periodos poco lluvioso y lluvioso, distribuyeron normalmente por la magnitud de los sesgos y curtosis estandarizados. El modelo de segundo orden resultó de buen ajuste, con coeficiente de determinación (R^2) superior a 94 % para todas las variables, cuyas expresiones permitieron analizar integralmente los factores de manejo en el comportamiento productivo del pasto, lo que facilita la toma de decisiones para su manejo.

Conclusiones: Se comprobó que los procedimientos asociados a la metodología de superficie de respuesta constituyen una herramienta eficiente para el análisis del crecimiento de los pastos.

Palabras clave: *Cynodon nlemfuensis*, experimentación, modelos matemáticos, productividad

Abstract

Objective: To use the response surface methodology to model the productivity changes of *Cynodon nlemfuensis* Vanderyst, subject to different fertilization doses and regrowth ages, under cutting conditions, in both seasons of the year.

Materials and Methods: The data were taken from experiments conducted at the Institute of Animal Science in a split-plot design. The main plot was the nitrogen application dose (0,200 and 400 kg N/ha/year). Meanwhile, in the subplots, the 12 regrowth ages (from 1 to 12 weeks) were placed. The total dry matter yield, leaf dry matter yield and stem dry matter yield, were analyzed as response variables. The data were adjusted to multiple regression and response surface models for each variable. They were statistically processed through the packages STATGRAPHICS® Centurion XVI and GeoGebra.

Results: The variables total dry matter yield, leaf dry matter yield and stem dry matter yield, for the dry and rainy seasons, normally decreased for the magnitude of the standardized biases and kurtosis. The second-order model was of good fit, with determination coefficient (R^2) higher than 94 % for all the variables, whose expressions allowed to analyze integrally the management factors in the productive performance of pasture, which facilitates decision-making for its management.

Conclusions: It was proven that the procedures associated to the response surface methodology constitute an efficient tool for pasture growth analysis.

Keywords: *Cynodon nlemfuensis*, experimentation, mathematical models, productivity

Introducción

En las ciencias agropecuarias es frecuente la realización de experimentos que garanticen respuestas apropiadas a diferentes problemas o procesos en

estudio, para lo que se requiere de técnicas adecuadas y eficientes en los procesos de investigación.

En Cuba, desde los años 70 y hasta la actualidad, se han realizado numerosas investigaciones

Recibido: 06 de junio de 2020

Aceptado: 23 de septiembre de 2020

Como citar este artículo: Fernández-Domínguez, Liansy; Pozo-Rodríguez, P. P. del; Fernández-Chuairé, Lucía & Herrera-García, R. S. Uso de la metodología de superficie de respuesta para modelar los cambios de productividad de *Cynodon nlemfuensis* Vanderyst bajo diferentes factores de manejo. *Pastos y Forrajes*. 43 (4):284-292, 2020.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido en Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/> El uso, distribución o reproducción está permitido citando la fuente original y autores.

que permitieron crear una base científica metodológica para el estudio de la dinámica de crecimiento y la calidad de los pastizales en condiciones controladas y de campo mediante estudios que comprenden indicadores óptimos (Rodríguez, 2015; López, 2016; Fernández-Chuairay *et al.*, 2017). En estos trabajos se estudiaron simultáneamente varios factores y sus interacciones. Sin embargo, los análisis estadísticos se centraron en la utilización de regresiones simples, cuando en el crecimiento intervienen múltiples factores de manejo. La aplicación de criterios estadístico-matemáticos, vinculados a la metodología de superficie de respuesta (MSR), puede contribuir a la solución de esta problemática.

En el contexto internacional, esta metodología se ha empleado como herramienta en investigaciones aplicadas a diversos sectores de la sociedad, como la industria alimentaria y química (Ponce *et al.*, 2018; Pillajo *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2019; De Lima *et al.*, 2020) y las ciencias agrícolas (Aredo *et al.*, 2014; Del-Ángel-Sánchez *et al.*, 2015; Yaguas, 2017). En Cuba, la literatura consultada evidencia que son escasas las investigaciones, en particular, en las ciencias agrarias, aunque se deben mencionar los trabajos de Guerra-Bustillo (1980), Miranda *et al.* (2013) y Guerra-Bustillo *et al.* (2018).

A pesar de que en la literatura científica no son abundantes las investigaciones que avalen las aplicaciones de la MSR para la caracterización de la dinámica de los pastizales y la determinación de los valores óptimos en diferentes niveles y factores de manejo, Guerra-Bustillo *et al.* (2018) señalaron que la MSR constituye una poderosa herramienta de la modelación matemática-estadística en el desarrollo científico-investigativo, al incorporar en sus procedimientos el álgebra matricial, cálculo diferencial, geometría analítica, investigación operacional, diseños de tratamientos y selección de modelos, entre otros aspectos, lo que puede ser de gran utilidad para el estudio de la dinámica de los ecosistemas de pastos.

El objetivo de este estudio fue utilizar la metodología de superficie de respuesta para modelar los cambios de productividad de *C. nlemfuensis*, sometido a diferentes dosis de fertilización y edades de rebrote en condiciones de corte, en ambos periodos.

Materiales y Métodos

Localización. La investigación se llevó a cabo en el Instituto de Ciencia Animal (ICA), ubicado en el municipio de San José de las Lajas, provincia Mayabeque, Cuba, entre los 22° 53' latitud norte y los 82° 02' latitud oeste, a 92 msnm.

Características edafoclimáticas. Los trabajos experimentales se desarrollaron en un suelo ferralítico rojo compactado (Hernández *et al.*, 2015), uniforme en todo su perfil y de rápida desecación. Durante el período experimental (mayo 1992-abril 1993), la temperatura media anual fue de 24,1 °C, con valores máximos entre 31,9 y 32,5 °C. El régimen de precipitación en el año es de 1 328,27 mm y la humedad relativa promedio de 79,6 %.

Diseño y tratamientos experimentales. Se utilizó un diseño de parcelas divididas con tres réplicas. La parcela principal fue la dosis de aplicación de nitrógeno (0, 200 y 400 kg de N/ha/año) como nitrato de amonio. Mientras, en las subparcelas se ubicaron las 12 edades de rebrote (desde 1 hasta 12 semanas). Se conformaron un total de 36 tratamientos, correspondientes a las combinaciones antes descritas (dosis de nitrógeno x edad de rebrote).

Procedimiento experimental. Se utilizó un área de *C. nlemfuensis* (pasto estrella), previamente establecida, con más de cinco años (más del 95 % de pureza). El resto del área estuvo cubierta por *Dichanthium annulatum* (Forssk.) Stapf., *Digitaria ciliaris* (Retz.) Koeler y *Cynodon dactylon* (L.) Pers., dividida en parcelas experimentales, con área cosechable de 10 m². Las parcelas se fertilizaron con una aplicación basal de 100 kg de P₂O₅/ha/año (superfosfato triple) y 200 kg de K₂O/ha/año (cloruro de potasio). En el período poco lluvioso, se aplicó riego por aspersión, a razón de 500 m³/ha.

Previo a cada ciclo experimental (dos en el poco lluvioso y dos en el lluvioso), las parcelas se cortaron con una segadora para uniformar el rebrote. Posteriormente, el corte se efectuó antes de las seis semanas de reposo en cada tratamiento entre ciclos de crecimiento.

El material verde cosechado se pesó en cada corte y se tomaron muestras paralelas de 200 g por cada tratamiento y réplica. Se fraccionaron en sus componentes estructurales (hoja y tallos) y se introdujeron en una estufa de circulación de aire a 60 °C hasta alcanzar peso constante, con el propósito de determinar el contenido de materia seca y el rendimiento de masa seca total, de las hojas y de los tallos.

Variables medidas. El estudio se realizó en los períodos lluvioso y poco lluvioso. Se observaron como variables respuesta el rendimiento de materia seca total (RMST), el rendimiento de materia seca de las hojas (RH) y el rendimiento de materia seca de los tallos (RT), expresados en tMS/ha. Se establecieron

la edad (semanas) y las dosis de nitrógeno (kg de N/ha/año) como variables independientes.

Análisis estadístico. Se conformó una matriz de datos con la información de los dos períodos estacionales: poco lluvioso (PPLL) y lluvioso (PLL). Para caracterizar todas las variables dependientes se utilizó la estadística descriptiva, con medidas de tendencia central y dispersión.

El procedimiento metodológico utilizado para la obtención de la superficie de respuesta incluyó para cada caso:

- Análisis de regresión múltiple.
- Bondad de ajuste.
- Representación gráfica de la superficie.
- Obtención de óptimos (analíticamente).
- Interpretación de los resultados.

El análisis de regresión múltiple se realizó a las tres variables dependientes antes mencionadas. Se consideró la edad y la dosis de nitrógeno como variables independientes.

Se aplicaron en todos los casos modelos de primer y segundo orden, dados por las ecuaciones:

$$f(x, y) = b_0 + b_1x + b_2y \quad \text{Primer orden}$$

$$f(x, y) = b_0 + b_1x + b_2y + b_3x^2 + b_4y^2 + b_5xy \quad \text{Segundo orden}$$

Donde:

$f(x, y)$: es la variable dependiente (respuesta)

x : variable independiente (factor 1): edad de rebrote

y : variable independiente (factor 2): dosis de fertilizante

b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 y b_5 , son parámetros de los modelos

Se utilizó como procedimiento de ajuste el método de mínimos cuadrados ordinarios, de acuerdo con los criterios estadísticos publicados por Burguillo (2005) y Bingham y Fry (2010), quienes expresaron que este es uno de los métodos más empleados en la estimación de parámetros en la regresión lineal.

Para la bondad de ajuste se utilizaron los criterios estadísticos referidos por Guerra-Bustillo *et al.* (2003) y Torres *et al.* (2012), que incluyen:

- Coeficiente de determinación (R^2).
- Significación del modelo.
- Error absoluto medio (EA).
- Estadístico de Durbin Watson.
- Análisis gráfico de los residuos.
- Selección del mejor modelo.
- Análisis de correlación entre los valores observados y los predichos por el mejor modelo.

Para la confección del gráfico de superficie de respuesta, una vez obtenida la ecuación, teniendo en cuenta la bondad de ajuste y el cumplimiento de los indicadores, se definió la función adecuada y se

graficó la región correspondiente a los datos analizados. Para los intervalos en estudio, se determinaron, en cada caso, las respuestas y combinaciones óptimas, o ambas.

Para la obtención de los óptimos mediante el método analítico, se aplicaron los criterios matemáticos, condiciones necesarias y suficientes para la localización de los puntos máximos, mínimos o de ensilladura de todas las respuestas obtenidas.

Para las funciones doblemente diferenciables, las condiciones necesarias y suficientes comprendieron el análisis del signo del determinante de la matriz Hessiana H y la anulación de las derivadas parciales para encontrar el punto crítico P . Estos criterios se presentan a continuación:

$H_f(P) > 0$ y $f_{xx}(P) > 0 \Rightarrow P$ es un mínimo relativo
 $H_f(P) > 0$ y $f_{xx}(P) < 0 \Rightarrow P$ es un máximo relativo
 $H_f(P) < 0 \Rightarrow P$ es un punto de silla

A partir de los óptimos, se determinó la presencia o no de estos puntos en la región experimental. En el caso de no estar en dicha región, se estimaron los valores de las variables independientes en las que se alcanzaron las mejores respuestas.

Los datos se procesaron mediante el paquete estadístico STATGRAPHICS® Centurión XVI para el análisis de regresión múltiple. Además, se utilizó el programa de matemáticas dinámicas en línea GeoGebra (2020) para determinar los valores óptimos mediante las condiciones necesarias y suficientes descritas.

Resultados y Discusión

El análisis descriptivo de las variables RMST, RH y RT, para los períodos poco lluvioso y lluvioso, se muestra en la tabla 1. Los datos se distribuyeron normalmente, según la magnitud de los sesgos y curtosis estandarizados, cuyos valores estuvieron entre -2 y +2, excepto el caso del RT en el período poco lluvioso, con un sesgo estandarizado de 2,15. Los valores máximos y mínimos para cada variable se encuentran entre los rangos normales para la especie, según las condiciones de manejo estudiadas (Pozo, 1998).

Al considerar los valores de RMST, RH y RT como variables dependientes, y la edad y la dosis de nitrógeno, como independientes, se obtuvieron las expresiones matemáticas que permiten describir el comportamiento de la superficie de respuesta para cada variable y época en estudio.

Según Rodríguez-González *et al.* (2018), ante la gran cantidad de modelos desarrollados, es necesario una evaluación y validación profunda, en

Tabla 1. Resumen estadístico descriptivo para el rendimiento de masa seca total y sus componentes morfológicos en los períodos lluvioso y poco lluvioso

Estadístico	RMST		RH		RT	
	PPLL	PLL	PPLL	PLL	PPLL	PLL
Número de observaciones	36	36	36	36	36	36
Media, t de MS/ha	1,52	2,58	0,69	1,25	0,83	1,34
Desviación estándar	1,13	1,97	0,43	0,88	0,71	1,09
Mínimo, t de MS/ha	0,15	0,04	0,09	0,03	0,05	0,01
Máximo, t de MS/ha	3,86	5,86	1,46	2,68	2,41	3,22
Rango	3,71	5,82	1,36	2,65	2,36	3,21
Sesgo estandarizado	1,71	0,63	1,08	0,38	2,15	0,86
Curtosis estandarizada	-0,77	-1,74	-1,26	-1,75	-0,30	-1,66

RMST: rendimiento de masa seca total, RH: rendimiento de masa seca de las hojas, RT: rendimiento de masa seca de los tallos
 PPLL: período lluvioso, PLL: período poco lluvioso

aras de adoptar el mejor modelo. En la tabla 2 se presentan los resultados de la bondad de ajuste, los que aportan coeficientes de determinación (R^2) altos, con valores superiores a 84 % en los modelos de primer orden, y por encima de 94 % para los de segundo. Se consideraron además, los valores del coeficiente de determinación ajustado, que fueron más elevados en los modelos cuadráticos. Se debe señalar que la variabilidad que mostraron las variables del rendimiento (RMST, RH y RT) se explica por los cambios en los valores de la fertilización y la edad del rebrote (> 97 % en PPLL y 94 % en PLL).

Se evidenció que las medias absolutas del error fueron relativamente menores en los modelos de segundo orden con respecto a los del primero. Los valores por la dócima de Durbin Watson (DW) mostraron que no hubo problemas de autocorrelación de errores, en los modelos de primer y segundo orden. No obstante, en el de segundo orden, para la variable RT, hubo incumplimientos en el período poco lluvioso, con valores del estadístico $DW < 1,4$. Esto indica la existencia de autocorrelación en los residuos.

Además, hubo correlación fuerte entre los valores predichos y los observados en todos los modelos. Fue superior en las expresiones de segundo orden, con coeficiente de correlación $r \geq 0,97$, lo que sugiere la buena bondad de ajuste de los modelos.

Ambos modelos presentaron buenos ajustes. Sin embargo, los criterios de selección mostraron que el modelo de segundo orden es el más indicado para representar y predecir la dinámica de los factores fertilización nitrogenada y edad de rebrote en los cambios de la productividad del pasto estrella, en los períodos poco lluvioso y lluvioso, respectivamente.

Thornley y France (1984) señalaron que los modelos matemáticos, que incluyen más de una variable, representan mejor la dinámica de crecimiento de las plantas, criterios válidos para el comportamiento que presentaron las variables estudiadas en este estudio. Villegas *et al.* (2019) plantean que la obtención de modelos no lineales puede ser de mucha ayuda para explicar y predecir el comportamiento de los pastos y los forrajes ante determinados factores como la edad. Los estudios realizados en Cuba en esta misma especie, con ambos factores independientes, indican que el comportamiento de las variables estudiadas responde a expresiones matemáticas de segundo grado.

En la tabla 3 se muestran los modelos de mejor ajuste para las variables respuestas y las expresiones gráficas, para las edades de rebrote y las dosis de aplicación de nitrógeno en los períodos poco lluvioso y lluvioso (de izquierda a derecha, respectivamente).

Para cualquier edad y época del año, el rendimiento de materia seca total fue superior cuando se suministró nitrógeno, y sus diferencias fueron más evidentes a partir de la tercera y quinta semana, en los períodos poco lluvioso y lluvioso, respectivamente. Resultados similares alcanzaron Méndez *et al.* (2019), al estudiar el efecto de la fertilización nitrogenada (0, 40,5 y 81 kg de N/ha) en el rendimiento del pasto estrella, con respuestas de hasta 40 % a medida que se incrementó la dosis (figura 1).

En la representación gráfica de los modelos (figura 1) se evidenció que, en ambas épocas del año, todas las variables respuesta obtuvieron mayores valores, a medida que aumentó la edad de rebrote y la dosis de fertilizante de forma simultánea, aunque

Tabla 2. Resultados de la bondad de ajuste de los modelos evaluados.

Variable	Primer orden	Segundo orden	Primer orden	Segundo orden
	Período poco lluvioso		Período lluvioso	
<i>Coefficiente de determinación R²</i>				
(RMST), %	87,28	98,44	85,78	94,95
(RH), %	88,37	97,06	86,62	95,21
(RT), %	84,85	97,95	84,22	94,44
<i>Coefficiente de determinación ajustado R²A</i>				
(RMST), %	86,51	98,19	84,92	94,11
(RH), %	87,67	96,57	85,81	94,41
(RT), %	83,93	97,60	83,27	93,52
<i>Significación del modelo (Valor - P)</i>				
RMST	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
RH	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
RT	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
<i>Media absoluta del error</i>				
RMST	0,29	0,10	0,57	0,35
RH	0,11	0,05	0,25	0,15
RT	0,20	0,07	0,34	0,19
<i>Durbin Watson</i>				
RMST	2,63 (P=0,96)	1,45 (P=0,04)	2,58 (P=0,95)	2,40 (P=0,84)
RH	2,59 (P=0,95)	2,41 (P=0,85)	2,26 (P=0,75)	2,24 (P=0,71)
RT	2,54 (P=0,94)	0,93 (P=0,0003)	2,74 (P=0,98)	2,53 (P=0,92)
<i>Coefficiente de correlación r_{op}</i>				
RMST	0,92	0,99	0,93	0,97
RH	0,93	0,98	0,94	0,97
RT	0,91	0,98	0,92	0,97

RMST: rendimiento de masa seca total, RH: rendimiento de masa seca de las hojas, RT: rendimiento de masa seca de los tallos

r_{op}: coeficiente de correlación entre los valores observados y predichos por el modelo

Tabla 3. Modelos matemáticos de mejor ajuste (donde: x = edad de rebrote, y= dosis de fertilizante).

Variable respuesta	Modelo
RMST poco lluvioso	$f(x,y) = -0.19 + 0.19x + 0.0004y - 0.006x^2 - 0.000002y^2 + 0.0006xy$
RMST lluvioso	$f(x,y) = -1.39 + 0.53x + 0.009y - 0.02x^2 - 0.00001y^2 + 0.0007xy$
RH poco lluvioso	$f(x,y) = -0.09 + 0.10x + 0.0008y - 0.004x^2 - 0.000001y^2 + 0.0002xy$
RH lluvioso	$f(x,y) = -0.67 + 0.29x + 0.004y - 0.01x^2 - 0.000007y^2 + 0.0002xy$
RT poco lluvioso	$f(x,y) = -0.10 + 0.08x - 0.0003y - 0.001x^2 - 6.45y^2 + 0.0004xy$
RT lluvioso	$f(x,y) = -0.71 + 0.24x + 0.005y - 0.07x^2 - 0.00001y^2 + 0.0004xy$

RMST: rendimiento de masa seca total, RH: rendimiento de masa seca de las hojas, RT: rendimiento de masa seca de los tallos

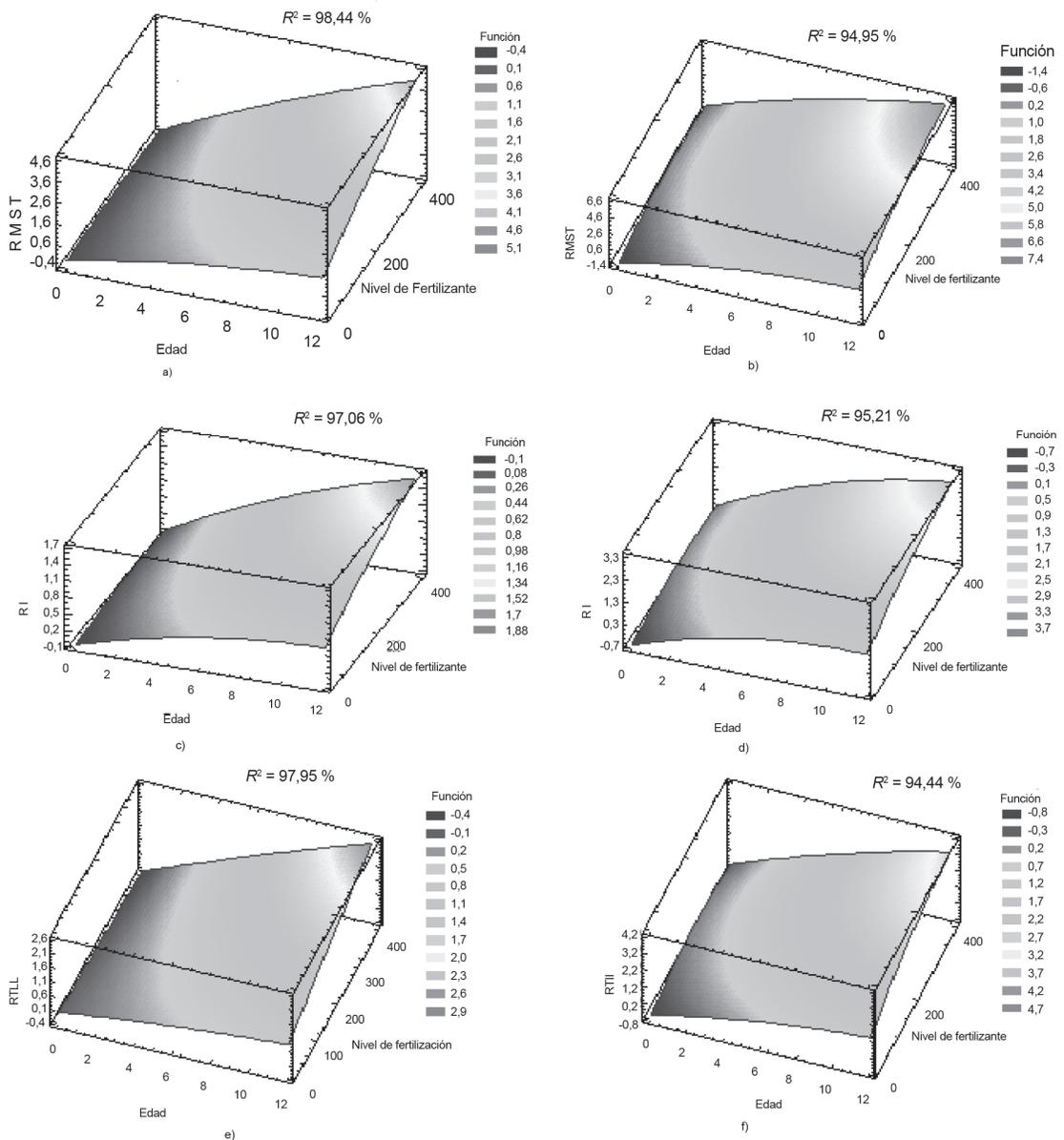


Figura 1. Representación gráfica de los modelos cuadráticos de superficie de respuesta para cada una de las variables estudiadas, en los períodos poco lluvioso y lluvioso (de izquierda a derecha respectivamente).

Edad de rebrote (semanas), dosis de fertilizante (kg N/ha/año).

Donde a)- b) representan a RMST; c)- d) a RH y e)- f) a RT

RMST: rendimiento de masa seca total, RH: rendimiento de masa seca de las hojas,

RT: rendimiento de masa seca de los tallos.

con comportamientos particulares en cada época del año. Similares resultados informaron López (2016), Martínez-Martínez *et al.* (2016), Reyes-Pérez *et al.* (2018) y Viteri-Velazco *et al.* (2018). Además, hubo aumento proporcional del rendimiento total (RMST) y sus componentes estructurales (RH y RT) con la edad y el fertilizante. Este efecto puede

estar dado, probablemente, por la mayor capacidad metabólica que presenta esta especie en los procesos de movilización y síntesis de sustancias orgánicas para la formación y el funcionamiento de sus estructuras (Pozo *et al.*, 2002).

Respuestas similares obtuvieron Ramos *et al.* (1987) en un estudio del crecimiento de *C. nlemfuensis* con

tres dosis de nitrógeno (0, 200 y 400 kg de N/ha/año) y tres edades de corte. Estos autores recomendaron cortar entre la quinta y sexta semana, con aplicación de 200 kg de N/ha/año, dosis con la que se alcanzaron los máximos valores de densidad y tasa de crecimiento.

Herrera y Ramos (2006) argumentaron que las frecuencias de corte más prolongadas proporcionaron mayores rendimientos. Sin embargo, señalaron la disminución progresiva de su calidad bajo este manejo.

Al evaluar el efecto de la edad de rebrote (35, 42, 49, 56, 63 y 70 días), la época del año y la especie en la composición nutricional de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit y *C. nlemfuensis*, asociados en un sistema silvopastoril intensivo, Martínez-Martínez *et al.* (2016) señalaron que la interacción edad y época afectó significativamente ($p < 0,05$) el porcentaje de masa seca y el período óptimo de cosecha de *L. leucocephala* asociada con pasto estrella, entre los 42 y los 49 días después de la poda o pastoreo en los períodos lluvioso y poco lluvioso, respectivamente.

Las condiciones necesarias y suficientes para la localización de los puntos extremos en los modelos de superficie de respuesta seleccionados mostraron los valores máximos del RMST, RH y RT, en ambos períodos, fuera de los rangos de los factores estudiados (edad y nitrógeno).

No obstante a lo anterior, en los intervalos estudiados, los valores máximos para las tres variables se obtuvieron a la edad de 12 semanas y con 400 kg de N/ha/año, en ambas estaciones, al alcanzar RMST de 4,20 t de MS/ha en el período poco lluvioso y 6,38 t de MS/ha en el lluvioso (tabla 4).

Maldonado-Peralta *et al.* (2019) plantearon que el rendimiento total de los pastos y sus componentes estructurales (hojas y tallos) se relacionaron de forma lineal y creciente con el incremento en la

edad de la planta, mientras que la relación hoja: tallo disminuyó conforme aumentó la edad, aspecto que constituye una regularidad en las gramíneas forrajeras utilizadas como pastos y forrajes.

Conclusiones

La utilización de la metodología de superficie de respuesta, que incluye el diseño, la modelación y la optimización de procesos, constituye una herramienta útil para representar y analizar el crecimiento de *C. nlemfuensis* y de otras especies con similar comportamiento, en cuanto al crecimiento vegetativo y dosis de nitrógeno y edad de rebrote similares, en ambas épocas del año.

La aplicación de esta metodología permitió la determinación de los extremos, que en cada indicador fueron variables en todas las expresiones para *C. nlemfuensis*, y se alcanzaron fuera de los intervalos estudiados. No obstante, permitieron obtener valores óptimos en la región de estudio y valorar otras alternativas para valores pronosticados según lo obtenido.

El polinomio de segundo grado mostró el mejor ajuste para las variables relacionadas con el rendimiento y un elevado coeficiente de determinación.

Agradecimientos

Se agradece al Instituto de Ciencia Animal de Cuba, donde se realizaron las investigaciones básicas, a la Universidad Agraria de La Habana y, en particular, al Programa de Maestría en Biomatemática.

Contribución de los autores

- Liansy Fernández-Domínguez. Realización de la investigación, el procesamiento de los datos y la redacción del manuscrito.
- Pedro Pablo Del Pozo-Rodríguez. Concepción de la idea principal de la investigación, el asesoramiento durante su desarrollo y la redacción del manuscrito.

Tabla 4. Máximos locales predichos en la optimización de las variables de rendimiento analizadas.

Variable	Valor óptimo	
	PPLL	PLL
RMST	4,20 t de MS/ha	6,38 t de MS/ha
RH	1,62 t de MS/ha	2,86 t de MS/ha
RT	2,96 t de MS/ha	3,50 t de MS/ha

Edad de 12 semanas y con una dosis de 400 kg de N/ha/año

RMST: rendimiento de masa seca total, RH: rendimiento de masa seca de las hojas, RT: rendimiento de masa seca de los tallos

- Lucía Fernández-Chuairey. Análisis y diseño estadístico, el asesoramiento de la investigación y del manuscrito.
- Rafael Herrera-García. Diseño y montaje de los experimentos, así como el asesoramiento de la investigación.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses entre ellos.

Referencias bibliográficas

- Aredo, V.; Velásquez, L.; Narro, O. & Domínguez, R. El método de superficie de respuesta y el modelamiento difuso en el desarrollo de una galleta con semillas de chía (*Salvia hispanica* L.). *Agroindustrial Science*. 4:27-34, 2014.
- Bingham, N. H. & Fry, J. M. *Regression linear models in statistics*. London: Imperial College, 2010.
- Burguillo, F. J. *Ajuste de ecuaciones a curvas: introducción a la regresión lineal y no lineal*. España. <http://web.usal.es/>, 2005.
- De Lima, Aída; Sánchez, María D.; Gómez, R.; Borregales, Carmen; Salas, Janeth; Izaguirre, C. *et al.* Metodología de superficie de respuesta para evaluar el efecto del contenido graso y tiempo de maduración en la lipólisis del queso tipo Brie. *Revista Ciencia e Ingeniería*. 41 (2):233-238, 2020.
- Del-Ángel-Sánchez, María T.; García-Alamilla, P.; Lagunes-Gálvez, Laura Mercedes; García-Alamilla, R. & Cabrera-Culebro, E. G. Aplicación de metodología de superficie de respuesta para la degradación de naranja de metilo con TiO₂ SOL-GEL sulfatado. *Rev. Int. Contam. Ambie*. 31 (1):99-106, 2015.
- Fernández-Chuairey, Lucía; Guerra-Bustillo, Caridad W.; Calzadilla-Pereyra, Josefina de & Lim-Chang, N. U. Desarrollo de la Modelación Estadístico-Matemática en las Ciencias Agrarias. Retos y perspectivas. *Revista Investigación Operacional*. 38 (5):462-467, 2017.
- GeoGebra. *GeoGebra es un software de matemáticas*. Instituto GeoGebra Internacional. <https://www.geogebra.org/>, 2020.
- Guerra-Bustillo, Caridad W. *Relación modelo diseño de tratamientos en la determinación de las dosis óptimas de fertilizantes con experimentos de campo en Cuba*. Tesis de Doctorado en Ciencias Agrícolas. Sofía: Instituto de Suelos y Agroquímica Nikola Pushkarov, 1980.
- Guerra-Bustillo, Caridad W.; Cabrera, A. & Fernández, Lucía. Criterios para la selección de modelos estadísticos en la investigación científica. *Rev. cubana Cienc. agríc*. 37 (1):3-10, 2003.
- Guerra-Bustillo, Caridad W.; Ruiz-González, A.; Herrera-Villafranca, Magaly & Fernández-Chuairey, Lucía. La modelación matemática estadística en la metodología de superficie de respuesta. Aplicaciones agrícolas. *Revista de Ingeniería Agrícola*. 3 (4):67-73, 2018.
- Hernández, J. A.; Pérez, J. J.; Bosch, I. D. & Castro, S. N. *Clasificación de los Suelos de Cuba 2015*. Mayabeque, Cuba: Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, Instituto de Suelos, Ediciones INCA, 2015.
- Herrera, R. S. & Ramos, N. Factores que influyen en la producción de biomasa y calidad. *Pennisetum purpureum* para la ganadería tropical. [CD-ROM]. La Habana: Instituto de Ciencia Animal. p. 79-100, 2006.
- López, J. L. *Modelación y simulación del rendimiento del pasto estrella (Cynodon nlemfuensis) bajo diferentes condiciones de manejo y escenarios climáticos*. Tesis en opción al grado científico Máster en Biomatemática. Mayabeque, Cuba: Instituto de Ciencia Animal, 2016.
- Maldonado-Peralta, María de los Á.; Rojas-García, A. R.; Sánchez-Santillán, P.; Bottini-Luzardo, María B.; Torres-Salado, N.; Ventura-Ríos, J. *et al.* Análisis de crecimiento del pasto Cuba OM-22 (*Pennisetum purpureum* x *Pennisetum glaucum*) en el trópico seco. *Agro Productividad*. 12 (8), 2019. DOI: <https://doi.org/10.32854/agrop.v0i0.1445>.
- Martínez-Martínez, M.; Reyes-Cruz, A.; Lara-Bueno, A.; Miranda-Romero, L. A.; Huerta-Bravo, M. & Uribe-Gómez, M. Composición nutricional de leucaena asociada con pasto estrella en la Huasteca Potosina de México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc. Pub. Esp*. 16:3343-3355. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263146726015>, 2016.
- Méndez, R.; Fernández, J. A. & Yáñez, E. A. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre la producción y composición de *Cynodon plectostachyus*. *Rev. Vet*. 30 (1):48-53, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.30972/vet.3013899>.
- Miranda, Ileana; Arévalo, Jersys & Hidalgo-Díaz, L. Metodología de superficie respuesta para evaluar estabilidad en almacén de un agente de control biológico. *Rev. Protección Veg*. 28 (3):224-228. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1010-27522013000300011&lng=es, 2013.
- Pillajo, J.; Bravo-Vásquez, J. & Vernaza, María G. Efecto de la cocción y la concentración de sal como pretratamiento de chips de mashua (*Tropaeolum tuberosum*) obtenidos por fritura al vacío. *Inf. tecnol*. 30 (4):13-22, 2019. DOI: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000400013>.
- Ponce, M.; Navarrete, D. & Vernaza, María. Sustitución parcial de harina de trigo por harina de lupino (*Lupinus mutabilis* Sweet) en la producción de pasta larga. *Inf. tecnol*. 29 (2):195-204, 2018. DOI: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000200195>.

- Pozo, P. P. del. *Análisis del crecimiento del pasto estrella (Cynodon nlemfuensis) bajo condiciones de corte y pastoreo*. Tesis de doctorado. La Habana: Instituto de Ciencia Animal, 1998.
- Pozo, P. P. del; Herrera, R. S. & García, M. Dinámica de los contenidos de carbohidratos y proteína bruta en el pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis*) con aplicación de nitrógeno y sin ella. *Rev. cubana Cienc. agríc.* 36 (3):275-280. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=1930/193018103001>, 2002.
- Ramos, N.; Herrera, R. S.; Padilla, C.; Barrientos, A. & Aguilera, J. M. *Pasto estrella mejorado (Cynodon nlemfuensis) su establecimiento y utilización en Cuba*. La Habana: EDICA, 1987.
- Reyes-Pérez, J. J.; Méndez-Martínez, Y.; Herrera-Gallo, S. M.; Luna-Murillo, R. A.; Zambraño-Burgos, D. A.; Franco-Ochoa, D. A. *et al.* Indicadores productivos y calidad del *Andropogon gayanus*. *REDVET*. 19 (9). https://www.researchgate.net/publication/328554886_Components_of_the_yield_and_chemical_composition_of_Cynodon_nlemfuensis, 2018.
- Rodríguez, L. *Modelación y simulación de la producción de biomasa de Pennisetum purpureum Schum. var. king grass y su aplicación en la alimentación animal*. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Veterinarias. Mayabeque, Cuba: Instituto de Ciencia Animal, 2015.
- Rodríguez-González, O.; Florido-Bacallao, R. & Varela-Nualles, M. Aplicaciones de la modelación matemática y la simulación de cultivos agrícolas en Cuba. *Cultivos Tropicales*. 39 (1):121-126. <http://scielo.sld.cu/pdf/ctr/v39n1/ctr18118.pdf>, 2018.
- Thornley, J. H. M. & Thornley, J. *Mathematical model in agriculture: A quantitative approach to problems in agriculture and related sciences*. Butterworths, UK: Bernhard Kiewel Rare Books, 1984.
- Torres, Verena; Barbosa, I.; Meyer, R.; Noda, Aida & Sarduy, Lucía. Criterios de bondad de ajuste en la selección de modelos no lineales en la descripción de comportamientos biológicos. *Rev. cubana Cienc. agríc.* 46 (4):345-350. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=1930/193027579001>, 2012.
- Villegas, D. A.; Valbuena, Nora & Milla, M. E. Evaluación de modelos aplicados a la producción de materia seca de *Brachiaria brizantha* en el periodo lluvioso. *Rev. Cienc. Agr.* 36 (1):33-45, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.193601.97>.
- Viteri-Velazco, L.; Calderón-Sabando, M. J. & Mendoza-Delgado, M. A. Fertilización nitrogenada y frecuencia de corte sobre producción forrajera del pasto estrella. *RECA*. 2 (3):7-15. <http://www.revistaecuadorianadecienciaanimal.com/index.php/RECA/article/view/87/84>, 2018.
- Wang, T.; Zhou, Y.; Cao, S.; Lu, J. & Zhou, Y. Degradation of sulfanilamide by Fenton-like reaction and optimization using response surface methodology. *Ecotox. Environ. Safe.* 172:334-340, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.01.106>.
- Yaguas, O. J. Metodología de superficie de respuesta para la optimización de una producción agrícola. *Ingeniería Industrial*. 16 (1):205-222, 2017. DOI: <https://doi.org/10.22320/S07179103/2017.13>.