

Bases teóricas para el uso de la Metodología de Superficies de Respuesta. Aplicación de un caso práctico en estudios de crecimiento del Pasto Estrella (*Cynodon nlemfuensis*)

Theoretical bases for the use of the Response Surface Methodology. Application of a practical case in studies of growth of the Star Grass (Cynodon nlemfuensis)

Ing. Liansy Fernández Domínguez¹, Dr. C Pedro Pablo del Pozo Rodríguez², Dra. C Lucía Fernández Chuairey³

Universidad Agraria de La Habana "Fructuoso Rodríguez Pérez".
Autopista Nacional, carretera Tapaste, km 23 ½, San José de Las Lajas, Mayabeque.

Autores para correspondencia: liansy@unah.edu.cu

Resumen

La ganadería es considerada una de las actividades económicas más antiguas del hombre, en Cuba es una de las más afectadas por la crisis económica de los años noventa (Período Especial) y también una de las que más insuficiente recuperación presenta. Una de las formas de alimentación más económicas que existe en la ganadería vacuna, es el manejo de pastos y forrajes, por lo que conocer aspectos fundamentales sobre ellos, permitiría implementar estrategias adecuadas para su utilización. En las investigaciones en el área del conocimiento de las ciencias agropecuarias es frecuente el desarrollo de diseños de experimentos para la obtención de datos que, en combinación con el empleo de técnicas estadísticas, la interpretación de resultados y el conocimiento científico de los investigadores, permiten encontrar soluciones óptimas al proceso en estudio. El presente trabajo tuvo como objetivo realizar un estudio de las bases teóricas y prácticas sobre el uso de la Metodología de Superficies de Respuesta y su aplicación en la producción de pastos y forrajes. Además, se presenta una aplicación de la Metodología de Superficies de Respuestas en un caso práctico en estudios de crecimiento del pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis*), con la variable respuesta Rendimiento del Tallo (RTL) para época de lluvia y como variables independientes el nivel de nitrógeno (0, 200 y 400 kg/año) y las edades de rebrote desde 1 hasta 12 semanas.

Palabras claves: Ganadería, Pasto Estrella (*Cynodon nlemfuensis*), Diseño Estadístico de Experimentos, Metodología de Superficies de Respuesta.

Abstract

Cattle Raising is considered one of the oldest economic activities of man, in Cuba is one of the most affected by the economic crisis of the nineties (Special Period) and also one of the most insufficient recovery presents. The management of pastures and forages is one of the most economical forms of feeding that exists in the cattle ranch, reason why knowing fundamental aspects on them, would allow to implement suitable strategies for its use. In research in the area of knowledge of agricultural sciences, it is common to develop designs for experiments to obtain data that, in combination with the use of statistical techniques, the interpretation of results and the scientific knowledge of researchers, allow us to find optimal solutions to the process under study. The objective of this work was to carry out a study of the theoretical and practical bases on the use of Response Surface Methodology and its application in the production of pastures and forages. In addition, an application of the Response Surface Methodology is presented in a practical case in studies of growth of the star grass (*Cynodonlemfensis*), with the response variable Stem yield (RTLL) for rainy season and as independent variables the level of nitrogen (0, 200 and 400 kg / year) and regrowth ages from 1 to 12 weeks.

Key words: Cattle Raising, Star Pasture (*Cynodonlemfensis*), Statistical Design of Experiments, Response Surface Methodology.

Recibido: 11 de febrero de 2019

Aprobado: 21 de febrero de 2019

Introducción

La ganadería es considerada una de las actividades económicas más antiguas del hombre que consiste en el manejo de animales domesticables con fines de producción para su aprovechamiento, el ganado vacuno es una especie que se cría a todo lo largo y ancho de Cuba por su alta capacidad de producción de leche, carne y otros usos, por ello es de vital importancia realizar una correcta nutrición y manejo en aras de incrementar sus producciones.

Actualmente la ganadería vacuna es una de las actividades más afectadas por la crisis económica de los años noventa (Período Especial) y también una de las que más insuficiente recuperación presenta. Sin embargo, dentro del sector agropecuario es la rama que reviste mayor importancia estructural en el ámbito económico, por el impacto de sus producciones en el consumo alimentario de la población, su incidencia potencial en la sustitución de importaciones; su encadenamiento con la industria proveedora de insumos y equipos y muy especialmente con las ramas láctea y cárnica de la industria alimentaria en su condición de proveedora de materias primas, integrando una cadena productiva agroindustrial de

Introduction

Livestock is considered one of the oldest economic activities of man that consists of the management of domesticable animals for production purposes for their use, cattle is a species that is raised throughout the length and breadth of Cuba due to its high capacity production of milk, meat and other uses, therefore it is vitally important to carry out correct nutrition and management in order to increase their productions.

Currently, cattle farming is one of the activities most affected by the economic crisis of the 1990s (Special Period) and also one of the most insufficiently recovered. However, within the agricultural sector it is the branch that has the greatest structural importance in the economic sphere, due to the impact of its productions on the population's food consumption, its potential impact on import substitution; its linkage with the input and equipment supplier industry and especially with the dairy and meat branches of the food industry in its capacity as a supplier of raw materials, integrating a significant agroindustrial production chain; as well as by

significativa dimensión; así como por el uso de los recursos naturales, particularmente en el caso de la tierra y la magnitud de los activos que posee (MINAG, 2018).

Actualmente el estado cubano se encuentra enfrascado en la elaboración de la estrategia de desarrollo de la economía nacional hasta el 2030, en cuya dirección se vienen dando los pasos iniciales en materia de identificación de los ejes y sectores estratégicos que deben orientar el futuro decursar de la economía cubana. Entre los ejes estratégicos aprobados por parte de las instituciones, se encuentra el asociado a la transformación productiva, y en particular la recuperación de la base alimentaria basada en el uso de los pastos y forrajes.

Según López (2016) una de las formas de alimentación más económicas que existe en la ganadería vacuna, es el manejo de pastos y forrajes, por lo que conocer aspectos fundamentales sobre ellos, permitiría implementar estrategias adecuadas para su utilización.

Para Álvarez (2000) en Cuba se han realizado diversos experimentos con los objetivos de encontrar aquellas especies que mostraran mayores contenidos de proteínas y digestibilidad de la materia seca, mayores rendimientos en corte o disponibilidad en pastoreo bajo diferentes sistemas de manejo, intensidad y frecuencia de defoliación, respuesta al riego y la fertilización, arrojando como resultado los pastos del género *Andropogon*, *Cynodon nlemfuensis*, *Pennisetum purpurem*, entre otros.

Según Herrera (2009) un gran número de estas investigaciones que estudian el comportamiento de los sistemas de producción de pastos en Cuba y su uso en la alimentación animal, se apoyan en herramientas matemáticas y estadísticas. Desde los inicios de los años 1960 a 1980 se destacan trabajos de (Funes, 1977) y (Herrera, 1981) quienes emplearon la modelación estadístico- matemática en estudios sobre pastos tropicales.

Posteriormente Del Pozo (1998) en su investigación sobre el crecimiento y desarrollo del pasto estrella, arrojó resultados significativos al emplear modelos de regresión para la búsqueda de

the use of natural resources, particularly in the case of land and the magnitude of the assets it owns (MINAG, 2018).

Currently, the Cuban state is involved in the elaboration of the development strategy of the national economy until 2030, in which direction the initial steps have been taken in terms of identifying the strategic axes and sectors that should guide the future course of the Cuban economy. Among the strategic axes approved by the institutions is that associated with productive transformation, and in particular the recovery of the food base based on the use of pastures and forages.

According to López (2016) one of the most economical forms of feeding that exists in cattle farming is the management of pastures and forages, so knowing fundamental aspects about them would allow the implementation of appropriate strategies for their use.

For Álvarez (2000) in Cuba, various experiments have been carried out in order to find those species that show higher protein content and dry matter digestibility, higher cutting yields or availability in grazing under different management systems, intensity and frequency of defoliation, response to irrigation and fertilization, resulting in grasses of the genus *Andropogon*, *Cynodon nlemfuensis*, *Pennisetum purpurem*, among others.

According to Herrera (2009), a large number of these investigations that study the behavior of pasture production systems in Cuba and their use in animal feeding, are supported by mathematical and statistical tools. From the beginning of the years 1960 to 1980, there are works by (Funes, 1977) and (Herrera, 1981) who used statistical-mathematical modeling in studies of tropical pastures.

Later Del Pozo (1998) in his research on the growth and development of star grass, yielded significant results when using regression models

soluciones óptimas. De igual forma se destacan los trabajos de (Rodríguez, 2015) y (López, 2016) entre otros.

En todos estos trabajos mencionados anteriormente existe una tendencia en realizar un Diseño Estadístico de Experimentos (DEE) utilizando un solo factor. Según Ferré y Rius (2014) plantean que, aunque el DEE se puede aplicar cuando se estudia un solo factor sin duda sus ventajas se aprecian mejor cuando se debe estudiar más de un factor. En Cuba a pesar de los esfuerzos realizados y resultados alcanzados por este método tradicional, existen limitaciones en cuanto al empleo de otros procedimientos como el llamado Metodología de Superficies de Respuesta (MSR).

En tal sentido este hecho constituye la motivación fundamental para la elaboración de este trabajo, que tiene como objetivo realizar un estudio de las bases teóricas y prácticas sobre el uso de la Metodología de Superficies de Respuesta y su aplicación en la producción de pastos y forrajes.

Desarrollo

Diseño estadístico de experimentos (DEE)

En el campo de las Ciencias Agropecuarias es frecuente la realización de experimentos que garanticen respuestas apropiadas a diferentes problemas o procesos en estudio, donde se requiere de técnicas adecuadas y eficientes en los procesos de investigación. El Diseño Estadístico de Experimento asume esta problemática, la literatura reporta diversos criterios sobre la definición de DEE, algunos de ellos se exponen a continuación.

Una definición General de DEE fue planteada por Gutiérrez y Vara (2012) quienes señalan que el diseño de experimento es precisamente la forma más eficaz de hacer pruebas. El DEE consiste en determinar cuáles pruebas se deben realizar y de qué manera, para obtener datos que, al ser analizados estadísticamente, proporcionen evidencias objetivas que permitan responder las interrogantes planteadas, y de esa manera clarificar los aspectos inciertos de un proceso, resolver un problema o lograr mejoras.

to search for optimal solutions. Similarly, the works of (Rodríguez, 2015) and (López, 2016), among others, stand out.

In all these works mentioned above there is a tendency to perform a Statistical Design of Experiments (DEE) using a single factor. According to Ferré and Rius (2014) argue that, although the DEE can be applied when studying a single factor, its advantages are undoubtedly better appreciated when more than one factor must be studied. In Cuba, despite the efforts made and results achieved by this traditional method, there are limitations regarding the use of other procedures such as the so-called Response Surfaces Methodology (MSR).

In this sense, this fact constitutes the fundamental motivation for the preparation of this work, which aims to carry out a study of the theoretical and practical bases on the use of the Response Surfaces Methodology and its application in the production of pastures and forages.

Development

Statistical design of experiments (DEE)

In the field of Agricultural Sciences, it is frequent to carry out experiments that guarantee appropriate responses to different problems or processes under study, where appropriate and efficient techniques are required in the research processes. The Statistical Design of Experiment assumes this problem, the literature reports various criteria on the definition of DEE, some of them are set out below.

A General definition of DEE was proposed by Gutiérrez and Vara (2012) who point out that the design of the experiment is precisely the most efficient way to carry out tests. The DEE consists of determining which tests should be carried out and in what way, to obtain data that, when statistically analyzed, provide objective evidence that allows answering the questions posed, and thus clarifying the uncertain aspects of a process, solving a problem or achieve improvements.

Y alegan que las bases del DEE están fundamentadas en el trabajo de Fisher (1935), quien influyó de manera decisiva en la investigación agrícola, pues aportó métodos para evaluar los resultados de los experimentos con muestras pequeñas.

Otros autores como Ferré y Rius (2014) proponen como definición de DEE: una metodología basada en útiles matemáticos y estadísticos cuyo objetivo es ayudar al experimentador a:

1. Seleccionar la estrategia experimental óptima que permita obtener la información buscada con el mínimo coste.
2. Evaluar los resultados experimentales obtenidos, garantizando la máxima fiabilidad en las conclusiones que se obtengan

En resumen, se puede decir que el DEE, no es más que un conjunto de herramientas matemáticas y estadísticas activas que se utilizan para analizar y proporcionar la información que se requiere con el mínimo de efectos aleatorios al objeto de investigación.

En este sentido Montgomery (1991) señaló que existen múltiples diseños experimentales para estudiar la gran diversidad de problemas que ocurren en la práctica, por lo que es importante conocer cómo elegir el más adecuado para una situación dada. A continuación, se relacionan los cinco aspectos que más influyen en la selección de un diseño experimental.

1. El objetivo del experimento.
2. El número de factores a estudiar.
3. El número de niveles que se prueban en cada factor.
4. Los efectos que interesa investigar (relación factores respuesta).
5. El costo del experimento, tiempo y precisión deseada.

Más tarde Bacio (2007) alega que las etapas que se pueden considerar en el diseño de experimentos son:

1. La planeación, la cual consiste en el planteamiento del problema, la selección de los factores de estudio, la determinación de los niveles

And they allege that the bases of the DEE are based on the work of Fisher (1935), who had a decisive influence on agricultural research, since he provided methods to evaluate the results of experiments with small samples.

Other authors such as Ferré and Rius (2014) propose as a definition of DEE: a methodology based on mathematical and statistical tools whose objective is to help the experimenter to:

1. Select the optimal experimental strategy that allows obtaining the information sought at the minimum cost.
2. Evaluate the experimental results obtained, guaranteeing maximum reliability in the conclusions obtained.

In summary, it can be said that the DEE is nothing more than a set of active mathematical and statistical tools that are used to analyze and provide the information that is required with the minimum of random effects to the object of investigation.

In this sense Montgomery (1991) pointed out that there are multiple experimental designs to study the great diversity of problems that occur in practice, so it is important to know how to choose the most appropriate for a given situation. The five aspects that most influence the selection of an experimental design are listed below.

1. The objective of the experiment.
2. The number of factors to study.
3. The number of levels that are tested on each factor.
4. The effects of interest to investigate (response factors relationship).
5. The cost of the experiment, time and desired precision.

Later Bacio (2007) argues that the stages that can be considered in the design of experiments are:

1. Planning, which consists of posing the problem, selecting the study factors, determining the levels at which they should

en los que deben de operar y por último, la selección de las variables que son de interés medir.

2. La experimentación es la etapa en la cual se plantea y se efectúa el diseño experimental.

3. El análisis de datos, etapa en la que se determina la técnica estadística que mejor describa el comportamiento de los datos.

4. Por último está la etapa de conclusiones, en la que, después de la interpretación de los resultados obtenidos, se recomiendan las medidas a implementar para establecer mejoras en el proceso.

En tal sentido Gutiérrez y Vara (2012) plantean que cuando se quiere mejorar un proceso existen dos maneras básicas de obtener la información necesaria para ello, una es observar y monitorear vía herramientas estadísticas, hasta obtener señales útiles que permitan mejorarlo, se conoce esta como una estrategia pasiva. La otra manera consiste en experimentar, hacer cambios estratégicos y deliberados al proceso para provocar dichas señales útiles

Estos autores consideran que dentro de cada rama existe una categorización general de los diseños experimentales y consideran que se pueden clasificar de acuerdo con el número de factores, el tipo de efectos que se pretende estudiar y según las restricciones existentes, un ejemplo de esto lo resumen en la figura 1

operate and finally, selecting the variables that are of interest to measure.

2. Experimentation is the stage in which the experimental design is proposed and carried out.

3. Data analysis, stage in which the statistical technique that best describes the behavior of the data is determined.

4. Finally, there is the conclusions stage, in which, after interpreting the results obtained, the measures to be implemented are recommended to establish improvements in the process.

In this sense, Gutiérrez and Vara (2012) state that when you want to improve a process, there are two basic ways to obtain the necessary information for this, one is to observe and monitor via statistical tools, until obtaining useful signals that allow improving it, this is known as a passive strategy. The other way is to experiment, make strategic and deliberate changes to the process to elicit those helpful signals.

These authors consider that within each branch there is a general categorization of the experimental designs and consider that they can be classified according to the number of factors, the type of effects to be studied and according to the existing restrictions, an example of this is summarized in figure 1.

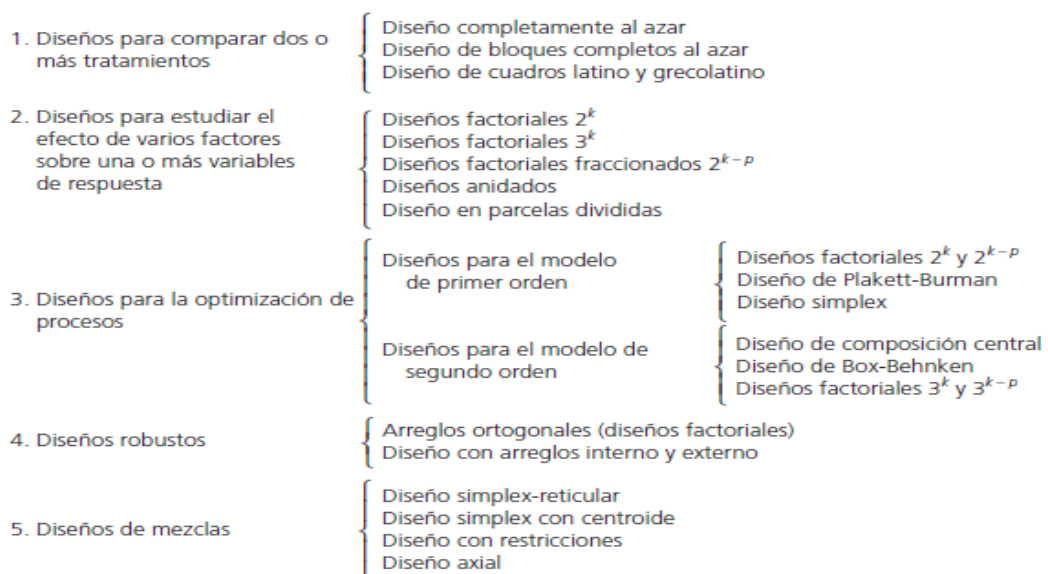


Figura 1: Clasificación de los diseños experimentales.

Figure 1: Classification of experimental designs.

Además los diseños de experimentos constituyen modelos estadísticos matemáticos para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso, a través de pruebas o ensayos experimentales planeados adecuadamente, esta metodología se ha ido consolidando como un conjunto de técnicas estadísticas y de ingeniería, que permiten entender mejores situaciones complejas de relación causa-efecto.

En el campo de las Ciencias Agropecuarias en Cuba durante los años 70 hasta la actualidad se han realizado numerosas investigaciones por diferentes autores; que permitieron crear una base científica metodológica para el desarrollo de experimentos con animales y plantas, bajo condiciones controladas y de campo con eficiencia e indicadores de óptimos en los diferentes procesos estudiados.

Destacándose en la época del 1970 al 1980, Funes (1977) y Herrera (1981), realizando experimentos con riegos y fertilización en diferentes etapas. A partir de 1990 se realizaron profundas transformaciones en la explotación de los pastos, basándose en sistemas de bajos insumos con un enfoque agroecológico y donde los sistemas ganaderos se consideran como un ecosistema, además del auge de la informática y de software estadísticos destacándose (Del Pozo, 1998), (Rodríguez, 2015), (López, 2016), y (Fernández *et al.*, 2017). Todos estos trabajos a pesar de contar con varios factores con interacción entre ellos, los diseños estadísticos de experimentos realizados se centran en variar un factor cada vez.

Según las clasificaciones antes mencionadas de DEE y los autores anteriormente consultados, para la interacción de varias respuestas con dos o más factores, la Metodología de Superficies de Respuesta (MSR) constituye una herramienta que resulta ser útiles para análisis e interpretación

In addition, the designs of experiments constitute mathematical statistical models to generate knowledge about a system or process, through properly planned experimental tests or trials, this methodology has been consolidated as a set of statistical and engineering techniques, which allow better understanding of situations complex cause-effect relationships.

In the field of Agricultural Sciences in Cuba during the 70's to the present, numerous investigations have been carried out by different authors; that allowed to create a methodological scientific basis for the development of experiments with animals and plants, under controlled and field conditions with efficiency and optimal indicators in the different processes studied.

Standing out in the period from 1970 to 1980, Funes (1977) and Herrera (1981), carrying out experiments with irrigation and fertilization in different stages. Starting in 1990, profound transformations were carried out in the exploitation of pastures, based on low-input systems with an agroecological approach and where livestock systems are considered as an ecosystem, in addition to the rise of statistical information and software standing out (Del Pozo , 1998), (Rodríguez, 2015), (López, 2016), and (Fernández *et al.*, 2017). All these studies, despite having several factors with interaction between them, the statistical designs of the experiments carried out focus on varying one factor at a time.

According to the aforementioned classifications of DEE and the previously consulted authors, for the interaction of several responses with two or more factors, the Response Surface Methodology (MSR) constitutes a tool that turns out to be useful for the analysis and interpretation of

de resultados experimentales con un factor en estudio.

Metodología de Superficies de Respuesta (MSR)

Los orígenes de la MSR se remiten al trabajo de Box y Wilson (1951), pero fue a partir de 1970 que, debido en parte al progreso de las computadoras, esta metodología ha tenido un desarrollo considerable tanto en aspectos teóricos como en aplicaciones.

Una fundamentación detallada de estos procedimientos y metodologías de trabajo aparecen reflejados en los trabajos de Montgomery (1991), quien considera que para el caso en el que se quisiera determinar los niveles de dos variables independientes x_1 y x_2 , que maximizan una variable dependiente y de un proceso, puede ser presentado por la siguiente función:

$$y = f(x_1, x_2) + e$$

Donde:

e - representa el ruido o error observado en la respuesta y

Si la respuesta se denota por $E(y) = f(x_1, x_2) = n$, entonces la superficie representada por: $n = f(x_1, x_2)$, se denomina **Superficie de Respuesta**. Es posible representar gráficamente la superficie de respuesta como se muestra en la Figura 2a donde n se grafica contra los niveles de x_1 y x_2 .

experimental results with a factor under study.

Response Surfaces Methodology (MSR)

The origins of MSR can be traced back to the work of Box and Wilson (1951), but it was from 1970 on that, due in part to the progress of computers, this methodology has undergone considerable development both in theory and in applications.

A detailed foundation of these procedures and work methodologies is reflected in the works of Montgomery (1991), who considers that for the case in which one wants to determine the levels of two independent variables x_1 and x_2 , which maximize a dependent variable y of a process, it can be presented by the following function:

$$y = f(x_1, x_2) + e$$

Where:

e - represents the noise or error observed in the response and

If the response is denoted by $E(y) = f(x_1, x_2) = n$, then the surface represented by: $n = f(x_1, x_2)$, is called the **Response Surface**. It is possible to graph the response surface as shown in Figure 2a where n is plotted against the levels of x_1 and x_2 .

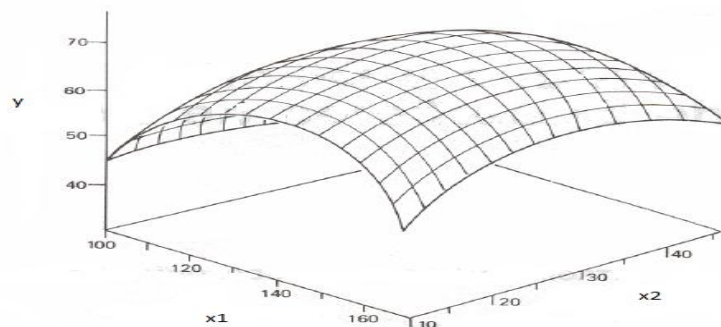


Figura 2a: Superficie de respuesta tridimensional donde se observa la respuesta esperada (y) en función de los factores x_1 y x_2 .

Figure 2a: Three-dimensional response surface where the expected response (y) is observed as a function of the factors x_1 and x_2 .

Además, el autor alega que esta respuesta se presenta como una superficie sólida en un espacio tridimensional y para visualizar mejor la forma de una superficie de respuesta, se grafican los contornos de dicha superficie como se muestra en la Figura 2b. En esta gráfica de contornos se trazan líneas de respuesta constante en el plano x_1 , x_2 . Cada contorno corresponde a una altura específica de la superficie de respuesta y alega que estas gráficas son útiles para estudiar los niveles de los factores que dan por resultados cambios en la forma o altura de la superficie de respuesta.

Furthermore, the author claims that this response is presented as a solid surface in three-dimensional space and to better visualize the shape of a response surface, the contours of said surface are plotted as shown in Figure 2b. Lines of constant response are drawn on this contour plot in the x_1 , x_2 plane. Each contour corresponds to a specific height of the response surface, and he claims that these graphs are useful for studying the levels of factors that result in changes in the shape or height of the response surface.

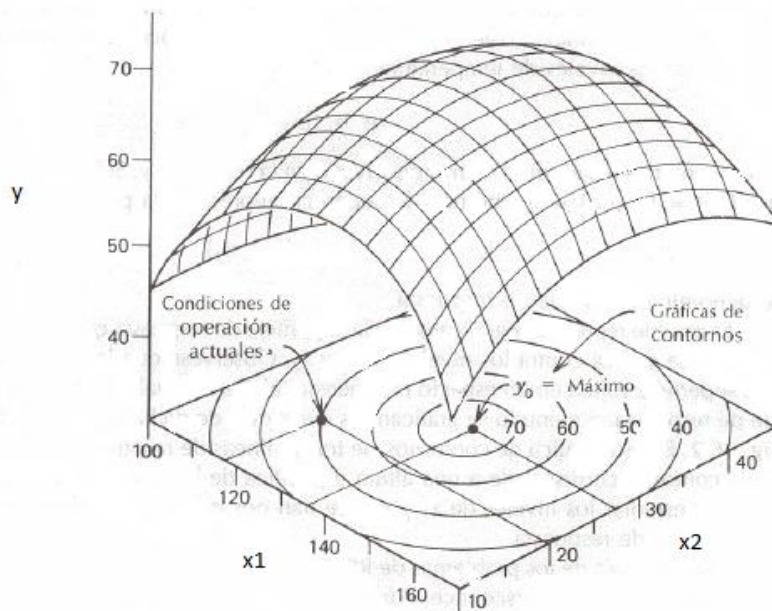


Figura 2b: Gráfica de contornos de una superficie de respuesta.

Figure 2b: Contour plot of a response surface.

Montgomery (1991) considera que la metodología de superficies de respuesta tiene dos etapas distintas, que son repetidas tantas veces cuantas fueran necesarias, con el objetivo de alcanzar una región óptima de la superficie investigada, estas son:

1. Modelamiento
2. Desplazamiento

El modelamiento, generalmente es hecho ajustándose a modelos simples (en general, lineales o cuadráticos), una respuesta

Montgomery (1991) considers that the response surface methodology has two different stages, which are repeated as many times as necessary, in order to reach an optimal region of the investigated surface, these are:

1. Modeling
2. Displacement

The modeling is generally done adjusting to simple models (in general, linear or

obtenida con planeamientos factoriales o con planeamientos factoriales ampliadas.

El desplazamiento se da siempre a lo largo del camino de máxima inclinación de un determinado modelo que es una trayectoria en la cual la respuesta varía de forma más pronunciada.

Para Figueroa (2003) la MSR es un conjunto de técnicas utilizadas en el estudio de la relación entre una o más respuestas y un conjunto de factores o variables independientes, donde el objetivo es optimizar ésta(s) respuesta(s). Esta metodología se realiza mediante una experimentación secuencial, esto es, la aproximación a la región de interés se realiza de forma iterativa utilizando diseños cada vez más complejos, que dependen de la información que se obtiene en cada etapa

Más recientemente, Gutiérrez y Vara (2012) alegan que la metodología de superficies de respuesta es un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas útiles para modelar y analizar problemas en los cuales una respuesta de interés es influida por varias variables, y el objetivo es optimizar esta respuesta.

Un mapa conceptual elaborado por estos autores se muestra en la Figura 3, que permiten especificar las etapas de la metodología de superficies de respuesta.

quadratic), a response obtained with factorial planning or with extended factorial planning.

The displacement always occurs along the path of maximum inclination of a certain model, which is a path in which the response varies more pronounced.

For Figueroa (2003), MSR is a set of techniques used in the study of the relationship between one or more responses and a set of factors or independent variables, where the objective is to optimize this response (s). This methodology is carried out through sequential experimentation, that is, the approach to the region of interest is carried out iteratively using increasingly complex designs, which depend on the information obtained at each stage.

More recently, Gutiérrez and Vara (2012) argue that the response surface methodology is a set of mathematical and statistical techniques useful for modeling and analyzing problems in which a response of interest is influenced by several variables, and the objective is to optimize this answer.

A conceptual map prepared by these authors is shown in Figure 3, which allows specifying the stages of the response surfaces methodology.

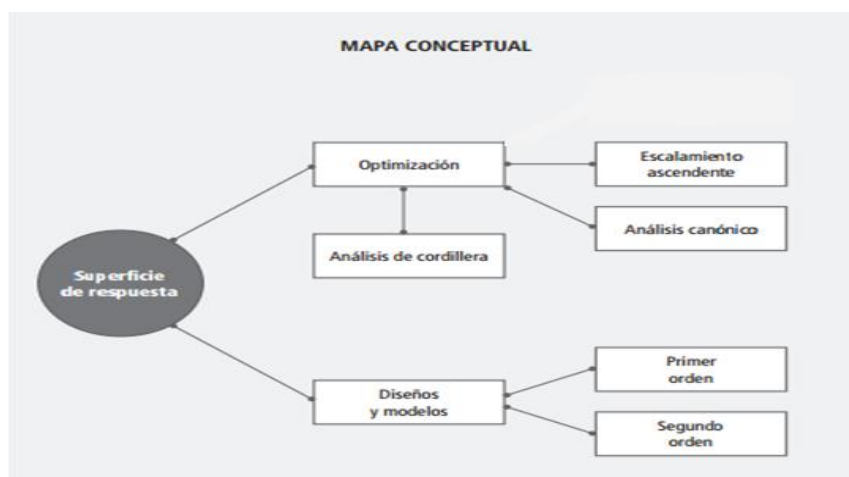


Figura 3: Mapa conceptual de las etapas de la MSR.

Figure 3: Concept map of the MSR stages.

En resumen, se puede decir que MSR consiste en tres pasos clave: Diseño, Modelación y Optimización.

Diseños y modelos para el uso de MSR

Un diseño es el conjunto específico de combinaciones de los niveles de las k variables que se utilizará al llevar a cabo el experimento.

Según se pudo apreciar en la Figura 1 expuesta en el epígrafe Diseño Estadístico de Experimentos presentado anteriormente, para los autores Gutiérrez y Vara (2012) los principales diseños que se utilizan en la MSR dependen del tipo de modelo a que mejor ajuste presente, para el modelo lineal o de primer orden, se utilizan los diseños factoriales 2^k , 2^{k-p} , *Plakett Burman* y *Simplex*; mientras que, para los modelos cuadráticos o de segundo orden, los diseños más comunes son el Central Compuesto, *Box Behnken* y factoriales 3^k y 3^{k-p} .

La elección de un diseño adecuado del experimento a realizar es fundamental para modelar y explorar la superficie de respuesta usada para ajustar un modelo polinómico al conjunto de datos recogidos en los puntos del diseño (Ruiz *et al.*, 2017).

Según Rossetan y Ludin (1973) definieron modelo como la reproducción de las propiedades de un objeto que se investiga en otro análogo y se construye según determinadas normativas de forma tal que exista analogía entre las partes y los procesos de los objetos.

Para otros autores como Hart (1988); Ramos y Freyre (1992), Del Pozo y Fernández (1999) un modelo es una representación simbólica de forma simplificada de un objeto o sistema, el cual describe cada una de las etapas de los procesos que rigen dicho objeto, así como las posibles interacciones o interrelaciones que se representan, tomando como base las causas o relaciones

In summary, it can be said that MSR consists of three key steps: Design, Modeling and Optimization.

Designs and models for using MSR

A design is the specific set of combinations of the levels of the variables that will be used in conducting the experiment.

As could be seen in Figure 1 exposed in the Statistical Design of Experiments section presented above, for the authors Gutiérrez and Vara (2012) the main designs used in the MSR depend on the type of model to which the best fit is present, for the linear or first order model, the factorial designs 2^k , 2^{k-p} , *Plakett Burman* and *Simplex* are used; while, for quadratic or second order models, the most common designs are *Compound Central*, *Box Behnken* and 3^k and 3^{k-p} factorials.

The choice of an appropriate design of the experiment to be carried out is essential to model and explore the response surface used to fit a polynomial model to the set of data collected at the design points (Ruiz *et al.*, 2017).

According to Rossetan and Ludin (1973), they defined a model as the reproduction of the properties of an object that is investigated in another analog and is built according to certain regulations in such a way that there is an analogy between the parts and processes of the objects.

For other authors like Hart (1988); Ramos and Freyre (1992), Del Pozo and Fernández (1999) a model is a simplified symbolic representation of an object or system, which describes each of the stages of the processes that govern said object, as well as the possible interactions or interrelationships that are represented, based on the causes or qualitative or quantitative functional

funcionales cualitativas o cuantitativas que determinan el funcionamiento de los sistemas u objetos.

Otras definiciones más actuales la dan los autores Thornley y France (2007), Rykov *et al.* (2010), Dey *et al.* (2011) y Jay (2012) planteando que un modelo es la representación simplificada del mundo real, en los cuales se destacan características relevantes del fenómeno en estudio.

De forma general un modelo no es más que una representación de los elementos que constituyen un fenómeno. Son por excelencia la herramienta principal que utiliza la estadística para simbolizar problemas o situaciones de la vida. Un caso particular lo constituyen los modelos matemáticos y estadísticos.

Según Gutiérrez y Vara (2012), en MSR, de manera específica los modelos y diseños pueden ser de primero o segundo orden (plano o con curvatura) utilizando un análisis de regresión lineal múltiple junto con sus elementos básicos (parámetros del modelo, modelo ajustado, significancia del modelo, prueba de falta de ajuste, residuos, predichos, intervalos de confianza y coeficiente de determinación), a continuación, se describen dichos modelos:

Modelo lineal de primer orden sin interacción (o producto cruzado)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon$$

Modelo lineal de primer orden con interacciones

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_1 X_2 + \varepsilon$$

Modelo cuadrático o de segundo orden

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \varepsilon$$

En general el modelo de superficie se puede escribir como:

$$Y = \beta_0 + \sum_i \beta_i X_i + \sum_{ii} \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i<j} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon$$

Los parámetros del modelo se estiman mediante el método de los mínimos

relationships that determine the functioning of systems or objects.

Other more current definitions are given by the authors Thornley and France (2007), Rykov *et al.* (2010), Dey *et al.* (2011) and Jay (2012) stating that a model is the simplified representation of the real world, in which relevant characteristics of the phenomenon under study are highlighted.

In general, a model is nothing more than a representation of the elements that constitute a phenomenon. They are par excellence the main tool used by statistics to symbolize problems or situations in life. A particular case is constituted by mathematical and statistical models.

According to Gutiérrez and Vara (2012), in MSR, specifically the models and designs can be first or second order (flat or with curvature) using a multiple linear regression analysis together with its basic elements (model parameters, fitted model, significance of the model, lack of fit test, residuals, predictions, confidence intervals and coefficient of determination), these models are described below:

First-order linear model without interaction (or cross product)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon$$

First-order linear model with interactions

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_1 X_2 + \varepsilon$$

Quadratic or second order model

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \varepsilon$$

In general the surface model can be written as:

$$Y = \beta_0 + \sum_i \beta_i X_i + \sum_{ii} \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i<j} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon$$

The model parameters are estimated using the least squares method. Once we have the

cuadrados. Una vez que se tienen los estimadores se sustituyen en la ecuación y se obtiene el modelo ajustado.

De forma general se puede decir que el diseño y el modelo se piensan al mismo tiempo y dependen del tipo de comportamiento que se espera de la respuesta.

Optimización en la MSR

Una vez que se cuenta con una buena aproximación de la superficie de respuesta o sea con un modelo ajustado, el siguiente paso es encontrar las condiciones óptimas de operación del proceso, que son las que dan por resultado valores óptimos de una o varias características de calidad del producto. (Bacio, 2007). Estas condiciones óptimas deben cumplir con estar dentro de ciertas regiones, las cuales se describen a continuación:

Para un proceso en específico hay que considerar los valores que pueden tomar cada uno de los factores que intervienen en el mismo, es decir, el conjunto de puntos donde el equipo o proceso puede ser operado. A esta región se le conoce como región de operabilidad O y para delimitarla adecuadamente habría de estudiar bien las especificaciones del aparato mediante el cual se lleva a cabo el proceso. En la práctica puede ser difícil realizar el experimento en toda la región de operabilidad, por lo que esta se restringe a una región más pequeña, llamada región experimental o región de interés, llamada R , y es el espacio delimitado por los rangos de experimentación utilizados con cada factor.

Se supone que en ésta región la verdadera superficie de respuesta puede ser aproximada por una función polinomial (en este caso por polinomios de primer o segundo orden) y por lo mismo las conclusiones que se obtengan del experimento sólo tienen validez dentro de esta región.

estimators, they are substituted in the equation and the fitted model is obtained.

In general it can be said that the design and the model are thought at the same time and depend on the type of behavior expected from the response.

Optimization in MSR

Once a good approximation of the response surface is available, that is, with an adjusted model, the next step is to find the optimal operating conditions of the process, which are those that result in optimal values of one or more quality characteristics of the product. (Bacio, 2007). These optimal conditions must comply with being within certain regions, which are described below:

For a specific process, we must consider the values that each of the factors involved in it can take, that is, the set of points where the equipment or process can be operated. This region is known as the region of operability O and to properly delimit it, the specifications of the apparatus by which the process is carried out should be carefully studied. In practice, it can be difficult to carry out the experiment in the entire operability region, so this is restricted to a smaller region, called the experimental region or region of interest, called R , and is the space delimited by the experimentation ranges used with each factor.

It is assumed that in this region the true response surface can be approximated by a polynomial function (in this case by first or second order polynomials) and therefore the conclusions obtained from the experiment are only valid within this region.

Figure 4 presents a scheme proposed by Gutiérrez and Vara (2012) of the MSR, where three stages are distinguished in the

En la Figura 4 se presenta un esquema propuesto por Gutiérrez y Vara (2012) de la MSR, donde se distinguen tres etapas en la búsqueda del punto óptimo, que son cribado, búsqueda I o de primer orden y búsqueda II o de segundo orden. A continuación, se describe brevemente cada una de estas etapas, más adelante se ven con detalle.

1. Cribado: La optimización de un proceso se inicia con esta etapa cuando tienen muchos factores (más de seis u ocho) que posiblemente influyen en la variable de interés.

2. Búsqueda I o de primer orden: Esta etapa se aplica cuando se tienen pocos factores (menos de cinco) y se sabe que estos influyen en la variable de respuesta. En esta etapa se corre un diseño de primer orden que permita caracterizar en forma preliminar el tipo de superficie de respuesta y detectar la presencia de curvatura. Por lo general se utiliza un diseño factorial completo o fraccionado con repeticiones al centro.

3. Búsqueda II o de segundo orden: En el momento en que se detecta la presencia de curvatura, o bien, que la superficie es más complicada que un hiperplano, se corre o se completa un diseño de segundo orden para caracterizar mejor la superficie y modelar la curvatura. Con el modelo ajustado se determinan las condiciones óptimas de operación del proceso.

search for the optimal point, which are screening, search I or first order and search II or second order. Each of these stages is briefly described below, they are discussed in detail later.

1. Screening: The optimization of a process begins with this stage when they have many factors (more than six or eight) that possibly influence the variable of interest.

2. I or first order search: This stage is applied when there are few factors (less than five) and it is known that these influence the response variable. In this stage, a first-order design is run that allows preliminary characterization of the type of response surface and detects the presence of curvature. A fractional or full factorial design with center repetitions is generally used.

3. II or second order search: As soon as the presence of curvature is detected, or that the surface is more complicated than a hyperplane, a second order design is run or completed to better characterize the surface and model the curvature. With the adjusted model, the optimal operating conditions of the process are determined.

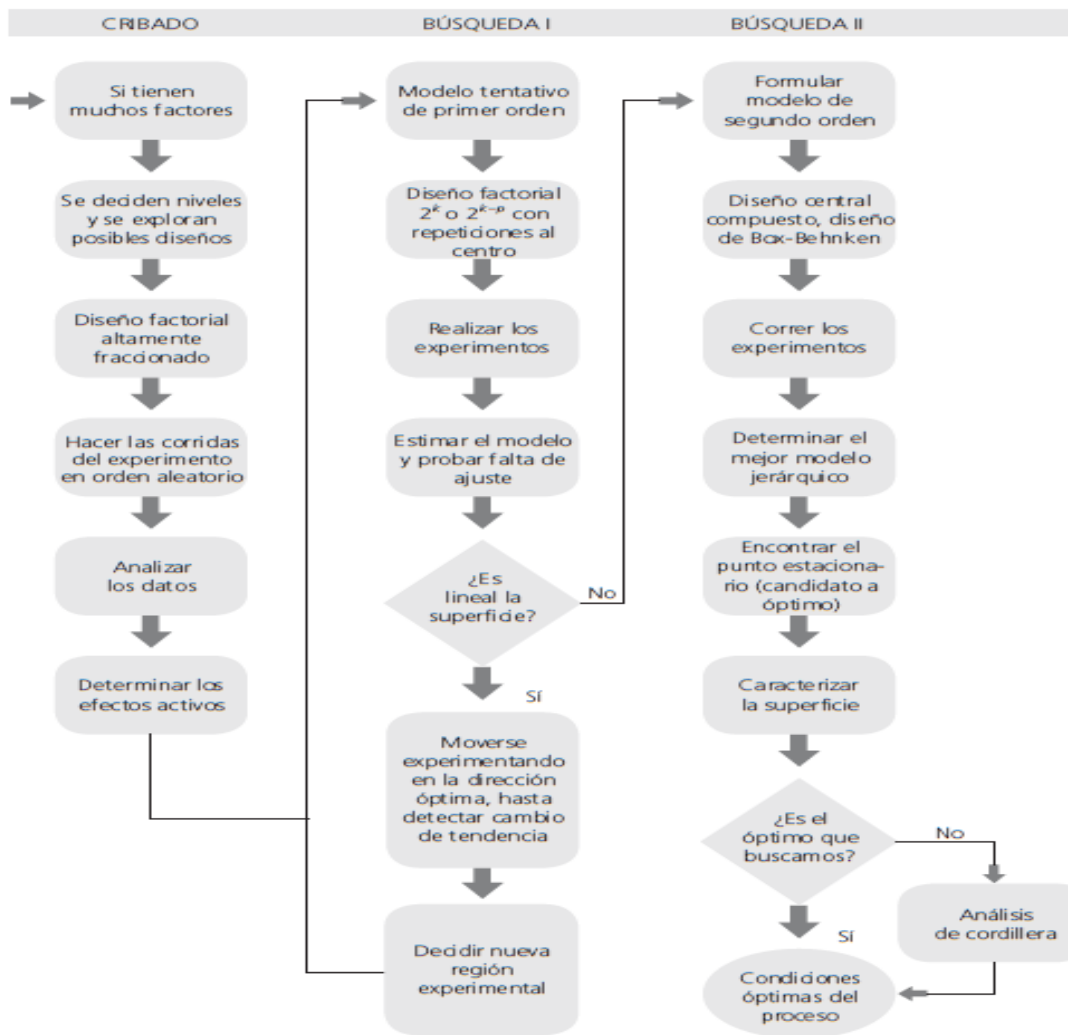


Figura 4: Esquema para la representación de las etapas de la búsqueda del punto óptimo.

Figure 4: Scheme for the representation of the stages of the search for the optimum point.

Según Montgomery (1991) la técnica de optimización a utilizar depende del tipo de modelo ajustado y existen básicamente tres métodos que son:

1. Escalamiento ascendente (o descendente): técnica que sirve para determinar puntos (tratamientos) por experimentar que están ubicados sobre la dirección de ascenso máxima a partir del centro del diseño inicial. Esta técnica se utiliza solo para modelos de primer orden.
2. Análisis canónico: Técnica empleada para caracterizar la superficie de segundo orden: las coordenadas del punto estacionario, el tipo de punto, y la orientación de la superficie. Esta técnica se basa en describir el

According to Montgomery (1991) the optimization technique to use depends on the type of fitted model and there are basically three methods which are:

1. Ascending (or descending) scaling: technique used to determine points (treatments) to experiment that are located on the maximum ascent direction from the center of the initial design. This technique is used only for first-order models.
2. Canonical analysis: Technique used to characterize the second-order surface: the coordinates of the stationary point, the type of point, and the orientation of the surface. This technique is based on rewriting the fitted second order model in its canonical form.

modelo ajustado de segundo orden en su forma canónica.

3. Análisis de cordillera: Técnica que se utiliza para determinar el mejor punto dentro de la región experimental.

De forma general en Cuba se presentan pocas investigaciones con aplicaciones de la MSR; en particular en el sector agropecuario Guerra (1980), la empleó para determinar dosis óptimas de fertilización N, P, K con experimentos de campo. Referente a esto Gómez y Batista (2006) en el Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas hicieron un estudio de optimización de medios de cultivos para microorganismos, para la producción de biopreparados de interés agrícola. Posteriormente en la rama agrícola (Miranda *et al.*, 2013), la utilizaron en estudios relacionados con la protección de plantas. Por otro lado, (Guerra *et al.*, 2018) plantean que la MSR se puede utilizar en las condiciones del ámbito agropecuario cubano y otras ramas de ciencia, por las posibilidades que aporta en la planificación y desarrollo de experimentos de tipo factorial completo o fraccionado, en forma secuencial o directa, según la experiencia acumulada sobre los niveles de los factores en análisis y la ubicación de la posible región del punto estacionario.

En estas situaciones expuestas anteriormente, se evidencia que la selección de una adecuada técnica de optimización garantizó incrementos en las variables respuestas, demostrando la efectividad de esta herramienta estadística en la optimización de medios para procesos, lo que sugiere una extensión de la aplicación de esta metodología para el estudio del comportamiento del crecimiento de los pastos y forrajes.

Importancia de los pastos y forrajes

En la mayoría de los países tropicales la base de la alimentación de los bovinos son los

3. Cordillera analysis: Technique used to determine the best point within the experimental region.

In general, in Cuba there are few investigations with applications of MSR; in particular in the agricultural sector Guerra (1980), used it to determine optimal doses of fertilization N, P, K with field experiments. Regarding this, Gómez and Batista (2006) at the National Institute of Agricultural Sciences made a study of optimization of culture media for microorganisms, for the production of biopreparations of agricultural interest. Later in the agricultural branch (Miranda *et al.*, 2013), they used it in studies related to plant protection. On the other hand, (Guerra *et al.*, 2018) suggest that MSR can be used in the conditions of the Cuban agricultural environment and other branches of science, due to the possibilities it provides in the planning and development of full or fractional factorial experiments, sequentially or directly, according to the accumulated experience on the levels of the factors under analysis and the location of the possible region of the stationary point.

In these situations set forth above, it is evident that the selection of an adequate optimization technique guaranteed increases in the response variables, demonstrating the effectiveness of this statistical tool in the optimization of means for processes, which suggests an extension of the application of this methodology for the study of the growth behavior of pastures and forages.

Importance of pastures and forages

In most tropical countries, the basis of the feeding of bovines is pastures, since these are the most economical source of food, so knowing fundamental aspects about them

pastos, dado que estos son la fuente más económica de alimento, por lo que conocer aspectos fundamentales sobre ellos y sobre su manejo, permitiría implementar estrategias adecuadas para su utilización, maximizando su producción y, en consecuencia, la respuesta de los animales (Solares, 2010).

En el mundo existen dos grandes sistemas productivos de leche. El primero se basa en la utilización de concentrados (piensos) y se desarrolla en países como Israel, EEUU, Canadá, Holanda y Francia. El otro sistema utiliza los pastos para la alimentación del ganado exclusivamente, y se desarrolla fundamentalmente en Australia, Nueva Zelanda, Argentina, Uruguay y países tropicales (Pacheco, 2015).

Según INATEC (2016) los pastos son plantas gramíneas y leguminosas que se desarrollan en el potrero y sirven para la alimentación del ganado mientras que los forrajes son gramíneas o leguminosas cosechadas para ser suministradas como alimento a los animales, sea verde, seco o procesado (heno, ensilaje, rastrojo, sacharina, amonificación).

En Cuba desde los primeros años de la colonia la ganadería se sustentaba a base de pastos, fundamentalmente, de gramíneas, aunque con el predominio de leguminosas autóctonas de los géneros: *Desmodium*, *Stylosanthes*, *Centrocema*, *Terannus*, *Macroptilium*, los cuales realizaron cuantiosos aportes a la sostenibilidad de los ecosistemas ganaderos (Funes, 2000). Con el desarrollo de los sistemas especializados y con el uso de animales altamente productivos para la producción como resultado del programa de mejoramiento genético desarrollado a partir de los años 80, se hizo necesario mejorar el potencial de producción y calidad de los pastizales ya existente y continuar con el programa de introducción, evaluación y selección de especies.

En este sentido se desarrollaron de manera integrada en los centros Estación

and their management would allow the implementation of adequate strategies for their use. , maximizing its production and, consequently, the response of the animals (Solares, 2010).

In the world there are two large milk production systems. The first is based on the use of concentrates (feed) and is developed in countries such as Israel, the USA, Canada, the Netherlands and France. The other system uses pastures to feed livestock exclusively, and is mainly developed in Australia, New Zealand, Argentina, Uruguay and tropical countries (Pacheco, 2015).

According to INATEC (2016), pastures are grass and legume plants that develop in the pasture and serve to feed livestock while forages are grasses or legumes harvested to be supplied as food to animals, whether green, dry or processed (hay, silage, stubble, sacharina, ammonification).

In Cuba, since the early years of the colony, livestock was based on pastures, mainly grasses, although with the predominance of autochthonous legumes of the genera: *Desmodium*, *Stylosanthes*, *Centrocema*, *Terannus*, *Macroptilium*, which made large contributions to the sustainability of livestock ecosystems (Funes, 2000). With the development of specialized systems and with the use of highly productive animals for production as a result of the genetic improvement program developed since the 1980s, it became necessary to improve the production potential and quality of the existing pastures and continue with the program of introduction, evaluation and selection of species.

In this sense, a significant number of agronomic and animal evaluation experiments of various genera were

Experimental de Pastos y Forrajes Indio Hatuey y el Instituto de Ciencia Animal, un número importante de experimentos de evaluación agronómica y con animales, de diversos géneros: *Cynodon*, *Panicum*, *Brachiaria Paspalum*, *Chloris*, *Cenchrus*, *Andropogon* y *Pennisetum*, entre otras. (Tabla 1).

developed in an integrated manner in the Indio Hatuey Pastures and Forages Experimental Station and the Animal Science Institute centers: *Cynodon*, *Panicum*, *Brachiaria Paspalum*, *Chloris*, *Cenchrus*, *Andropogon* and *Pennisetum*, among others. (Table 1).

Tabla 1: Principales géneros de pastos evaluados en la década de los años 80 por diversas instituciones científicas cubanas.

Table 1: Main pasture genera evaluated in the 1980s by various Cuban scientific institutions.

Categorías	Provincias				
	La Habana	S. Spiritus	Camagüey	Las Tunas	Granma
Sobresalientes	Pennisetum (14)	Pennisetum (10) Chloris (4)	Pennisetum (12) Tripsacum (3)	Tripsacum (2)	Pennisetum (13)
Destacadas	Tripsacum (1) Panicum (11) Cenchrus (3)	Andropogon (2) Cenchrus (5) Tripsacum (1) Sorhum (1)	Cenchrus (4)	Andropogon (1) Pennisetum (13) Cenchrus (4) Chloris (4)	Cenchrus (3)
Regulares	Chloris (4) Brachiaria (13) Andropogon (2)	Tripsacum (1) Brachiaria (6) Panicum (18) Sorhum (1)	Brachiaria (10) Andropogon (3) Cynodon (12) Panicum (14) Chloris (4)	Brachiaria (6) Cynodon (12) Panicum (8) Digitaria (4)	Chloris (3) Hermathria (1) Panicum (10) Brachiaria (8) Echinochloa (2)
Inferiores	Cynodon (11) Digitaria (5) Urochloa (1)	Digitaria (7) Cynodon (9)	Echinochloa (1) Setaria (1)	Urochloa (1)	Digitaria (4) Urochloa (1) Urochloa (1)

En estos experimentos según Álvarez (2000), los objetivos fundamentales fueron la búsqueda de aquellas especies que mostraran mayores contenidos de proteínas y digestibilidad de la materia seca, mayores rendimientos en corte o disponibilidad en pastoreo bajo diferentes sistemas de manejo, intensidad y frecuencia de defoliación, respuesta al riego y la fertilización, así como otras características deseables en la especie para condiciones de explotación comercial. Estos autores proponen como principales gramíneas y leguminosas regionalizadas en Cuba a las de las especies: *Andropogon*,

In these experiments according to Álvarez (2000), the fundamental objectives were the search for those species that showed higher protein contents and dry matter digestibility, higher yields in cut or availability in grazing under different management systems, intensity and frequency of defoliation, response to irrigation and fertilization, as well as other desirable characteristics in the species for commercial exploitation conditions. These authors propose as the main regionalized grasses and legumes in Cuba those of species: *Andropogon*,

Cynodon nlemfuensis, *Pennisetum purpureum*, entre otras (Tabla 2).

nlemfuensis, *Pennisetum purpureum*, among others (Table 2).

Tabla 2: Principales especies de Cuba.

Nombre común	Nombre científico	Nombre común	Nombre Científico
Andropogon	<i>Andropogon gayanus</i> CIAT-621	Caña de azúcar	<i>Sacharum officinarum</i>
Basilik	<i>Brachiaria decumbens</i> CIAT-606.	Aguada	<i>Brachiaria brizantha</i>
Buffel	<i>Cenchrus ciliaris</i> , <i>Biloela</i> , <i>Formidable</i> , <i>Verde y azul</i> .	Pasto estrella	<i>Cynodon nlemfuensis</i> cv. <i>Jamicano</i> y <i>Panameño</i> , <i>Tocumen</i>
King Grass	<i>Pennisetum purpureum</i>	Guinea	<i>Panicum maximum</i> , <i>común</i> , <i>australiana</i> , <i>Likoni</i> , <i>SIH-127</i> .
Bermuda	<i>Cynodon dactylon</i> <i>Coastcrooss 1,67,68</i> , de <i>Costa</i>	Sirato	<i>Macroptilium</i> <i>Atropurpureum</i>
Alfalfa	<i>Medicago sativa</i>	Terannus	<i>Terannus labialis</i>
Taiwan -144	<i>Pennisetum purpureum</i> , <i>Taiwan – 144</i> , <i>801-4</i>	Pangola	<i>Digitaria decumbens</i> , <i>común</i> y <i>PA-32</i>

Sin embargo, alrededor de los años 90' el empleo de insumos (riego y fertilización química) decreció de forma marcada, debido a problemas con la importación de fertilizantes, lo que condujo a la puesta en marcha de investigaciones sin la aplicación de fertilización mineral o excepcionalmente con dosis mínimas. Por las razones antes citadas desde esa fecha hasta la actualidad han primado las condiciones de nulos o bajos insumos en los experimentos.

Todos los estudios realizados representaron un indudable avance para la creación de la estructura varietal en el país, lo que se considera puede ser optimizado en la actualidad al valorar colecciones más o menos amplias de una especie en ambientes específicos y, en particular, en ambientes con limitaciones representativos de los

However, around the 90's the use of inputs (irrigation and chemical fertilization) decreased markedly, due to problems with the importation of fertilizers, which led to the start-up of investigations without the application of mineral fertilization or exceptionally with minimal doses. For the aforementioned reasons, from that date to the present, the conditions of zero or low inputs have prevailed in the experiments.

All the studies carried out represented an undoubted advance for the creation of the varietal structure in the country, which is considered to be currently optimized by evaluating more or less extensive collections of a species in specific environments and, in particular, in environments with representative limitations of current livestock agroecosystems, which include variables

agroecosistemas ganaderos vigentes, en los que se incluyan variables relacionadas con el comportamiento agronómico, bromatológico y del valor nutritivo, de manera tal que se puedan alcanzar resultados de connotada relevancia para la mejora de las áreas dedicadas a la explotación de los pastos y los forrajes en los agroecosistemas con limitaciones para la producción ganadera.

Generalidades del cultivo del pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis*)

La especie *Cynodon nlemfuensis* se ha adaptado en Cuba en suelos de fertilidad mediana a alta con drenaje de deficiente a regular y condiciones de secanos mostrando mejor comportamiento en pastoreo que en corte, despoblándose con este último cuando es muy frecuente y con baja altura de corte. Sus rendimientos máximos fueron de 20 t MS ha-1 año-1 promediando alrededor de 16,5. El pasto estrella presenta buenos valores de proteína bruta y digestibilidad si es cortado en edades tempranas (30-42 días) y si se aplican altas dosis de fertilizante (+ 400 kg ha-1 año-1), (Ramos, 1983).

Esta especie es oriunda de Rhodesia, se encuentra distribuida por África Oriental, desde Etiopía hasta Zambia y el Congo. El cultivar jamaicano se introdujo en Cuba en abril de 1973 procedente de la Estación Experimental de Bodle en Jamaica. El cultivar panameño se introdujo en el mes de julio del mismo año procedente de la Estación Experimental de Gualaca. Es una especie perenne, rastrera, los tallos rastreros y erectos muy ramificados, hojas de color verde. Florece en los meses de noviembre y enero; con inflorescencia digitada en ramas que oscilan entre 4 y 6. Estos híbridos son generalmente estériles (Ramos *et al.*, 1987).

Se emplea con éxito en el pastoreo de ganado en desarrollo y en vacas lecheras de baja y media producción y ganado de carne; soportan cargas medias o altas a pesar de lo

related to agronomic, bromatological behavior and nutritional value, so that results of connoted relevance can be achieved for the improvement of areas dedicated to the exploitation of pastures and forages in agroecosystems with limitations for livestock production.

Generalities of the cultivation of star grass (*Cynodon nlemfuensis*)

The *Cynodon nlemfuensis* species has adapted in Cuba to medium to high fertility soils with poor to regular drainage and dry conditions showing better grazing performance than cutting, depopulating with the latter when it is very frequent and with low cutting height. Its maximum yields were 20 t DM ha-1 year-1 averaging around 16.5. The star grass presents good values of crude protein and digestibility if it is cut at an early age (30-42 days) and if high doses of fertilizer are applied (+ 400 kg ha-1 year-1), (Ramos, 1983).

This species is native to Rhodesia, it is distributed throughout East Africa, from Ethiopia to Zambia and the Congo. The Jamaican cultivar was introduced to Cuba in April 1973 from the Bodle Experiment Station in Jamaica. The Panamanian cultivar was introduced in July of the same year from the Gualaca Experimental Station. It is a perennial, creeping species, highly branched creeping and erect stems, green leaves. It blooms in the months of November and January; with digitized inflorescence on branches that range between 4 and 6. These hybrids are generally sterile (Ramos *et al.*, 1987).

It is used successfully in developing cattle grazing and in low and medium production dairy cows and beef cattle; they support medium or high loads, despite which they maintain good stability. With fertilizations of

cual mantienen buena estabilidad. Con fertilizaciones de 240 kg de N/ha/año. Así mismo, en la producción de leche con dosis de fertilizante similares y cargas entre 3 y 4 vacas/ha se han alcanzado entre 9 y 11 litros de leche/vaca/día (Mileras, 1996).

Son muchos los factores que determinan la calidad del cultivo del pasto estrella para (Benítez *et al.*, 2007); la época del año tuvo marcada influencia en la capacidad de producción de biomasa, medida esta como la cantidad de hierba producida en cada hectárea de tierra; así como en las tasas de crecimiento, velocidad de rebrote de la hierba, relación hoja tallo y carga, los factores que determinan la producción de biomasa de los sistemas racionales de pastoreo en el Valle del Cauto están relacionados con las variables climáticas (precipitaciones y temperaturas) y de manejo (carga e intensidad de pastoreo) que se relacionan con variables que condicionan la calidad y el aprovechamiento del pasto estudiado.

Aplicación de la MSR en un caso práctico en estudios de crecimiento del pasto estrella (*Cynodon nlemfensis*).

En un estudio sobre el crecimiento de los pastos estrella (*Cynodon nlemfensis*) desarrollado en el centro experimental "Miguel Sistach Naya" perteneciente al departamento de Pastos y Forrajes del Instituto de Ciencia Animal (ICA), se observó cómo variables respuesta el Rendimiento del Tallo (RTLL) para época de lluvia y como variables independientes el nivel de nitrógeno (0, 200 y 400 kg/año) y las edades de rebrote desde 1 hasta 12 semanas.

Se contó con un total de 36 tratamientos, correspondiente a las combinaciones de edades por tratamiento. La conformación del procedimiento empleado para la obtención de las Superficies de Respuesta, incluyó análisis de regresión múltiple a partir de un

240 kg of N / ha / year. Likewise, in the production of milk with similar doses of fertilizer and loads between 3 and 4 cows / ha, between 9 and 11 liters of milk / cow / day have been reached (Mileras, 1996).

There are many factors that determine the quality of the star grass crop for (Benítez *et al.*, 2007); the time of year had a marked influence on the biomass production capacity, measured as the amount of grass produced in each hectare of land; as well as in growth rates, grass regrowth speed, leaf-stem and load ratio, the factors that determine the biomass production of the systems Rational grazing in Valle del Cauto are related to climatic variables (rainfall and temperatures) and management (grazing load and intensity) that are related to variables that condition the quality and use of the pasture studied.

Application of MSR in a practical case in growth studies of star grass (*Cynodon nlemfensis*).

In a study on the growth of star grasses (*Cynodon nlemfensis*) developed in the experimental center "Miguel Sistach Naya" belonging to the Department of Pastures and Forages of the Institute of Animal Science (ICA), it was observed how response variables the Stem Yield (RTLL) for the rainy season and as independent variables the nitrogen level (0, 200 and 400 kg / year) and the regrowth ages from 1 to 12 weeks.

There were a total of 36 treatments, corresponding to age combinations per treatment. The conformation of the procedure used to obtain the Response Surfaces, included multiple regression analysis from a quadratic model, goodness of fit, graphical

modelo cuadrático, bondad de ajuste, representación gráfica de la superficie, obtención de valores óptimos e interpretación de resultados.

La ecuación del modelo cuadrático está dada por:

$$z(x_i, y_i) = b_0 + b_1x_i + b_2y_i + b_3x_i^2 + b_4y_i^2 + b_5x_iy_i$$

Donde:

$z(x_i, y_i)$: variable respuesta (Rendimiento del Tallo)

x_i y y_i : son las variables independientes o factores (X_i edad; Y_i niveles de nitrógeno)

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

En el análisis de regresión realizado para la época de lluvia, fue posible obtener la ecuación matemática que permite describir comportamiento del rendimiento total en función de la edad y niveles de nitrógeno, ajustada al siguiente modelo cuadrático.

representation of the surface, obtaining optimal values and interpretation of results.

The equation of the quadratic model is given by:

$$z(x_i, y_i) = b_0 + b_1x_i + b_2y_i + b_3x_i^2 + b_4y_i^2 + b_5x_iy_i$$

Where:

$z(x_i, y_i)$: response variable (Stem Yield)

x_i and y_i : are the independent variables or factors (X_i age; Y_i nitrogen levels)

b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 and b_5 : these are parameters to be estimated from the models

In the regression analysis carried out for the rainy season, it was possible to obtain the mathematical equation that allows describing the behavior of the total yield as a function of age and nitrogen levels, adjusted to the following quadratic model.

$$y(x, y) = -2.36 + 0.15x + 2.14y - 0.007x^2 - 0.49y^2 + 0.08xy$$

Este modelo resultó estadísticamente significativos con p-valor = 0,000 y con un elevado coeficiente de determinación de $R^2=94.44\%$. Por otro lado, el supuesto de incorrección de Durbin-Watson arrojó valores de 2,40 con p-valor = 0,84 lo que mostró que no existen problemas de autocorrelación. El análisis gráfico de los residuos corroboró la distribución aleatoria de los residuos (figura 5).

This model was statistically significant with p-value = 0.000 and with a high coefficient of determination of $R^2 = 94.44\%$. On the other hand, the Durbin - Watson incorrectness assumption yielded values of 2.40 with p-value = 0.84, which showed that there are no autocorrelation problems. The graphic analysis of the residuals corroborated the random distribution of the residuals (figure 5).

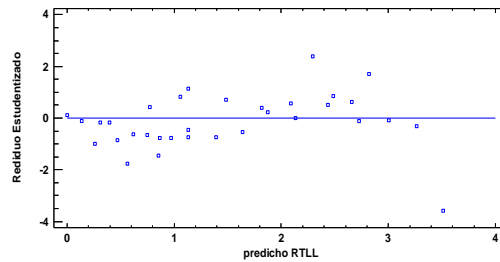


Figura 5: Gráfica de residuos para la variable Rendimiento del Tallo

Figure 5: Residual plot for the Stem Yield variable

La figura 5 muestra la representación gráfica de la superficie de respuesta e indica que la mejor dirección para obtener Rendimientos Totales que superen los 4.7 kg, corresponden a las mayores edades (12 semanas) y con niveles de nitrógeno de 200 Kg/año.

Figure 5 shows the graphic representation of the response surface and indicates that the best direction to obtain Total Yields that exceed 4.7 kg, correspond to the oldest ages (12 weeks) and with nitrogen levels of 200 kg / year.

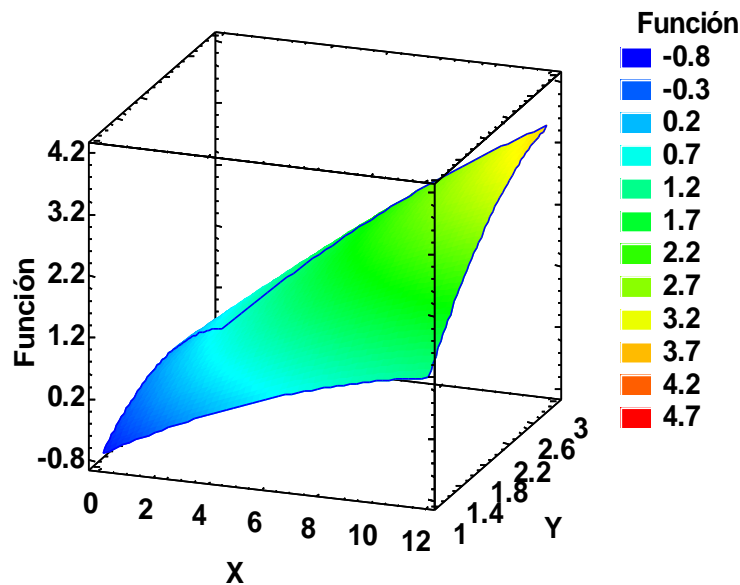


Figura 6: Gráfica de la superficie de respuesta

Figure 6: Graph of the response surface

Haciendo una valoración integral de los resultados alcanzados para el empleo de superficies de respuestas para indicadores de crecimiento de pastos, se considera que el modelo de Regresión Múltiple y el empleo de ecuaciones de segundo orden, permiten

Making a comprehensive assessment of the results achieved for the use of response surfaces for pasture growth indicators, it is considered that the Multiple Regression model and the use of second order equations allow characterizing growth processes under

caracterizar procesos de crecimiento bajo las condiciones en estudio y la obtención de indicadores óptimos.

Conclusiones

Los criterios y las valoraciones realizadas en el desarrollo de este trabajo evidencian que los procedimientos asociados a la Superficies de respuestas, que incluyen diseño, modelación y optimización de procesos, constituyen herramientas útiles en investigaciones agrarias y en particular a las asociadas a estudios de crecimiento y en particular del pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis*) bajo diferentes dosis de nitrógeno y edad de rebrote.

the conditions under study and obtaining optimal indicators.

Conclusions

The criteria and evaluations carried out in the development of this work show that the procedures associated with the response surfaces, which include design, modeling and optimization of processes, constitute useful tools in agricultural research and in particular those associated with growth studies and in particular of star grass (*Cynodon nlemfuensis*) under different nitrogen doses and regrowth age.

Bibliografía / References

- Álvarez, A. M. 2000. *Utilización de los pastos en Cuba. Situación actual*. La Habana, Cuba: Taller 35 Aniversario del ICA.
- Bacio, L. V. 2007. *Optimización Multi-Objetivo en el problema de metodología de Superficie Multi-Respuesta*. Tesis de Maestría. Guanajuato, México, Centro de Investigación en Matemática.
- Benítez, D; Fernández, J. L; Ray, J; Ramírez, A; Torres, V; Tandrón, I; Díaz, M. y Guerra, J. 2007. Factores determinantes en la producción de biomasa en tres especies de pastos en sistemas racionales de pastoreo en el Valle del Cauto, Cuba. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 41 (3), 231-235.
- Box, G. E. P. y Wilson, K. G. 1951. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. *Journal of the Royal Statistical Society*, vol 13, 1-45.
- Del Pozo, P. P. 1998. *Análisis del crecimiento del pasto estrella (C. nlemfuensis) bajo condiciones de corte y pastoreo*. Tesis de Doctorado. La Habana, Cuba, ICA.
- Del Pozo, P. P. y Fernández, L. 1999. *El papel de la modelación y la simulación en las ciencias agropecuarias*. La Habana, Cuba: UNAH.
- Dey, D. K; Ghosh, S. y Mallick, B. K. 2011. *Bayesian modelling in bioinformatics*. Chapman & Hall/CRC: Boca Raton.
- Fernández, Lucia; Guerra, C.W; De Calzadilla, J; Lin. N.U. 2017. Desarrollo de la Modelación Estadístico-Matemática en las Ciencias Agrarias. Retos y perspectivas. *Revista Investigación Operacional*. VOL 38. , No.5, 462-467.
- Ferré, J. y Rius, X. 2014. *Introducción al diseño estadístico de experimentos*. Universitat Rovira i Virgili: Pl. Imperial Tàrraco.
- Figuroa, G. 2003. *Optimización de una superficie de respuesta utilizando JMP IN*. Hermosillo: Memoria, semana XVII/XIII de investigación Universidad de Sonora.

Fisher, R. 1935. *The Design of Experiments*. Edimburgo: Oliver and Boyd.

Funes, F. 1977. *Introducción y evaluación inicial de gramíneas en Cuba*. Tesis de Doctorado. La Habana, Cuba, ICA.

Funes, F. 2000. *Utilización de los pastos en Cuba. Realidades y perspectivas*. La Habana, Cuba: Taller 35 Aniversario del ICA.

Gómez, G. y Batista, C. 2006. Optimización de medios de cultivos para microorganismos, una valiosa estrategia para la producción de biopreparados de interés agrícola. *Cultivos Tropicales* [en línea]. 27 (3). Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193215825002> [Consulta: 14 noviembre 2018].

Guerra, W. C. 1980. *Relación Modelo-Diseño de tratamientos para la determinación de las dosis óptimas de fertilización N, P, K con experimentos de campo*. Tesis de Doctorado. Bulgaria, Universidad de Sofia.

Guerra, W; Ruiz, A; Herrera, M; Fernández, L.2018. La modelación Matemática Estadística en la Metodología de Superficies de Respuesta. Aplicaciones Agrícolas. *Revista de Ingeniería Agrícola*, Vol 3, No. 4, pp 67-73, ISBN 2306- 1545.

Gutiérrez, H. y Vara, R. 2012. *Análisis y Diseño de Experimentos*. 3ra ed. D.F, México: McGraw-Hill. ISBN 978-607-15-0725-9.

Hart, R. D. 1988. *El papel de los modelos en la investigación y desarrollo*. La Habana, Cuba: Instituto de Ciencia Animal.

Herrera, R. S. 1981. *Influencia del fertilizante nitrogenado y la edad de rebrote en la calidad del pasto bermuda cruzada (Cynodon dactylon)*. Tesis de Doctorado. La Habana, Cuba, ICA, ISCAH.

Herrera, R. S. 2009. Mejoramiento de Pennisetum purpureum en Cuba. *Revista Cubana de Ciencias Agrícolas*, 345, 43.

INATEC. 2016. *Manual del Protagonista Pastos y Forrajes* [en línea]. Nicaragua. Disponible en: https://www.jica.go.jp/project/nicaragua/007/materials/ku57pq0000224spz-att/Manual_de_Pastos_y_Forrajes.pdf [Consulta: 15 octubre 2018].

ISAAC. 1978. *Segunda clasificación genética de los suelos cubanos*. La Habana: Editorial ECC.

Jay, O. 2012. *Metodología para la comparación de tratamientos en modelos de regresión no lineal aplicados a procesos biológicos*. Tesis de Doctorado. La Habana, Cuba, Instituto de Ciencia Animal. h. 100 p.

López, J. L. 2016. *Modelación y simulación del rendimiento del pasto estrella (C. nlemfuensis) bajo diferentes condiciones de manejo y escenarios climáticos*. Tesis de Maestría. Mayabeque, Cuba, ICA.

Mileras, M. 1996. *Producción de leche a partir accesiones de especies del género Cynodon en Cuba. Anais do workshop sobre o potencial forrageiro do genero Cynodon*. Brasil: EMBRAPA/ CNPEL. pp. 167-181.

MINAG.2018. Estudio sobre la competitividad de la producción lechera cubana. Ministerio de la Agricultura. Mimeo. 130pp.

- Miranda, I; Arévalo, J. y Hidalgo, L. 2013. Metodología de superficie respuesta para evaluar estabilidad en almacén de un agente de control biológico. *Revista de Protección Vegetal*, 28 (3), 224-228.
- Montgomery, D. 1991. *Diseño y análisis de experimentos*. 3ra ed. D.F, México: Grupo Editorial Iberoamérica.
- Pacheco, Y. 2015. *Avances en la producción y sostenibilidad de los pastos forrajes para la producción de leche en el trópico* [en línea]. Ecuador. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos43/pastos-yforrajes/> [Consulta: 15 octubre 2018].
- Ramos, N; Herrera, R. S; Padilla, C; Barrientos, A. y Aguilera, J. M. 1987. *Pasto Estrella mejorado (Cynodon nlemfuensis) su establecimiento y utilización en Cuba*. La Habana, Cuba: EDICA. 153 p.
- Ramos, L. A. y Freyre, R. E. 1992. *Filosofía, ciencia y tecnología en la agricultura*. La Habana, Cuba: Instituto de Ciencia Animal.
- Rodríguez, L. 2015. *Modelación y simulación de la producción de biomasa de Pennisetum Purpureum Schum vc. king grass y su aplicación en la alimentación animal*. Tesis de Doctorado. Mayabeque, Cuba, ICA.
- Rossetan, M. y Ludin, P. 1973. *Diccionario Filosófico*. Ciudad de la Habana. p. 498.
- Ruiz, A; Guerra, W; Morejón, Y. y Machado, M. 2017. *Metodología de Superficie de Respuesta como alternativa en la búsqueda de condiciones óptimas*. Mayabueque, Cuba: UNAH.
- Rykov, V. V; Balakrishnan, N. y Nikulin, M. S. 2010. *Mathematical and Statistical Models and Methods in Reliability*. London: Springer New York Dordrecht Heidelberg.
- Solares, G. 2010. *Reproducción bovina importancia de los pastos en la alimentación bovina* [en línea]. México. Disponible en: <http://reproduccionbovinayopalsena.blogspot.com/2010/03/importancia-delos.html> [Consulta: 15 octubre 2018].
- Thornley, J. y France, J. 2007. *Mathematical Models in Agriculture. Quantitative Methods for the Plant. Animal and Ecological sciences*. 2da ed. Cromwell Press: Trowbridge.