

UNIVERSIDAD AGRARIA DE LA HABANA
“Fructuoso Rodríguez Pérez”



FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS

INSTITUTO DE CIENCIA ANIMAL
GRUPO DE BIOMATEMÁTICA



Modelación y simulación del rendimiento del pasto estrella (*C. nlemfuensis*) bajo diferentes condiciones de manejo y escenarios climáticos.

Tesis presentada en opción al título de Master en Biomatemática

Autor: Ing. Jorge Lázaró López Rodríguez



Mayabeque, 2016

UNIVERSIDAD AGRARIA DE LA HABANA
“Fructuoso Rodríguez Pérez”



FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS

INSTITUTO DE CIENCIA ANIMAL
GRUPO DE BIOMATEMÁTICA



Modelación y simulación del rendimiento del pasto estrella (*C. nlemfuensis*) bajo diferentes condiciones de manejo y escenarios climáticos.

Tesis presentada en opción al título de Master en Biomatemática

Autor: Ing. Jorge Lázaró López Rodríguez

Tutores: Dr. C. Rubén Larduet Vicet
Dr. C. Lourdes Rodríguez Shade
Dr. C. Noraldo E. Ramos Mestre

Colaborador: Dr. C. Pedro Pablo del Pozo Rodríguez

Mayabeque, 2016

Pensamiento

*"Las matemáticas poseen
no sólo la verdad,
sino cierta belleza suprema.
Una belleza fría y austera,
como la de una escultura."*

Bertrand Russel

AGRADECIMIENTOS

Tengo la dicha de poder decir que hay a mi lado gente maravillosa que me apoya sin yo decir una sola palabra, quiero agradecer en especial la colaboración de varias personas sin las cuales no hubiera logrado concluir este trabajo. En especial a:

- *Dr. C. Lourdes Rodríguez Shade, Dr. C. Rubén Larduet Vicet, Dr. C. Noraldo E. Ramos Mestre, Dr. C. Justiniano R. Stuart Montalvo, Dr. C. Pedro Pablo del Pozo, MSc. Adrián Álvarez Adán, por su gran dedicación, consejos y conocimientos aportados. Gracias por todo.*
- *Mi mamá, mi padrastro, mi abuelita, mis tíos Roldan y Lidia por el gran apoyo y consejos, espero les sean transmitidos a mi hermanita, les quiero mucho.*
- *Dra. C. Magaly Herrera, Lucia Sarduy, Mildrei, Yolaine, Sarai, Mejía y demás miembros del departamento de Biomatemática gracias a todos por acogerme como un miembro más, su apoyo y dedicación.*
- *A mi otra madre Mercedes, un súper agradecimiento, por su gran preocupación, sus consejos, por ponerme freno cuando daba todo por perdido, muchas gracias por todo.*
- *Colectivo de profesores de la maestría y en especial a la profesora Lucía a la cual le debemos mucho, gracias por su paciencia y confianza.*
- *Amaury, Adanay, Jeniffer, Leysi, Yosleydis, y demás profesores que compartimos esta hermosa etapa de investigación.*
- *Todos los profesores del Departamento de Informática por este tiempo que hemos compartido muchas experiencias, gracias por todo.*
- *Mi familia de Tapaste, el Yole, Pedro, Nilsa, Maritza, el Micha, Yulian, Yilian, Liset, Cobi, Carlito, Leydi, Oscarito, Sandy, Paula, Madelaine, Yudelmis, Tango, Emilio, Noaidi, gracias por su apoyo y consejos.*
- *A mi otra familia Inés, Humberto padre, Humberto T y Handy, gracias por su gran apoyo y dedicación, se les quiere mucho.*

- *Mis grandes hermanas Leyanis, Dayne, Yudi las amo mucho, gracias por soportarme.*
- *Mis amigos(a) Claudia, Bayby, Alejandro, Anaelys, y personas de la Dirección de Relaciones Internacionales.*
- *Yailin, por su tiempo dedicación, esfuerzo, su gran apoyo, agradezco mucho tenerme siempre presente y poder contar contigo incondicionalmente.*
- *A los miembros del colectivo del Centro de Estudio de Desarrollo Agrario y Rural: Rey, Grey, Lili, Vargas, Emilio, Elaine, Darais, Ojeda, Fabianne, Aimara, Mayra, Franchi y demás miembros, gracias por todo su apoyo, dedicación y por soportarme diariamente.*
- *A mi hermano Yasser, por su amistad, apoyo y dedicación, le agradezco todo su esfuerzo.*
- *A: Yahima, Rosmery, Adonys, por su preocupación, les agradezco todo.*
- *A : Meybol Maricela Mena Montero, agradezco cada momento que ha estado presente, ha sido de gran apoyo, aunque esté lejos, gracias.*
- *A: Nataly Ruano mi gran amiga, gracias por toda la preocupación y cada aliento brindado.*
- *A: Lulú Valdez ha sido muy especial conmigo le agradezco el esfuerzo y la dedicación.*
- *A: Anaelys, Pepe, Julia, Dayami, Marlon, Magalys e Ileana les agradezco mucho su preocupación y las ayudas brindadas.*
- *A todas aquellas personas que de una u otra forma han contribuido a mi formación profesional.*

“A todos muchas gracias”

Dedicatoria

A mi mamá.

A mi abuela y mis tíos.

A mis amigos y familiares de tapaste.

A mi hermana María Fernanda para que siga mi ejemplo.

RESUMEN

El presente trabajo de tesis tuvo como objetivos modelar y simular la producción de materia seca acumulada (RMSA) del pasto estrella (*C. nlemfuensis*) y estudiar la influencia de dos escenarios climáticos sobre el desempeño de esta variable y de esta forma contribuir a la toma de decisiones en condiciones ambientales desfavorables para el desarrollo de este cultivo. Los escenarios considerados fueron: temperatura media del planeta se eleve 2 °C (**A2**) y que esta variable se eleve 4 °C (**B2**). Para ello, se utilizó información de experimentos generados en áreas del Instituto de Ciencia Animal y de trabajos publicados acerca de la influencia del clima sobre RMSA, se encontró que el modelo Gompertz fue el de mejor ajuste del RMSA vs la edad de rebrote, con elevados coeficientes de determinación, sesgos y errores de estimación pequeños en todas las mediciones analizadas. Se obtuvieron además un grupo de indicadores notables para la toma de decisiones de productores e investigadores, tales como punto de inflexión (edad del cultivo en la cual su curva de crecimiento pasa de un tipo de concavidad a otra), valor óptimo de cosecha, que corresponde al valor de la edad en que se intersectan las curvas de incrementos corriente medio (RMSA dividida entre la edad) y diario (derivada de la función de Gompertz evaluada en la edad), entre otros. Fue seleccionado el modelo multiplicativo exponencial para estudiar el efecto del clima sobre RMSA, donde se apreció que los escenarios estudiados **A2** y **B2**, tuvieron efectos negativos sobre el rendimiento de materia seca acumulada, debido a que ocasionaron aumento de temperatura media y disminución de las precipitaciones y radiación global. Se obtuvo un programa computacional (SERPE) que estima los rendimientos acumulados de materia seca bajo diferentes condiciones ambientales.

Palabras claves: modelación, simulación, materia seca acumulada, función de Gompertz, SERPE

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	9
1.1 Modelo matemático	9
1.2 Modelación matemática.....	10
1.3 Aplicaciones de la modelación y simulación matemática en la producción de pastos y forrajes en Cuba.	15
1.4 Descripción del pasto estrella (<i>C. nlemfuensis</i>).....	16
CAPÍTULO 2. MODELACIÓN DE LA DINÁMICA DE ACUMULACIÓN DE BIOMASA ENPASTO ESTRELLA (<i>C. NLEMFUENSIS</i>). EFECTO DE ÉPOCA	24
2.1 Introducción.....	24
2.2 Materiales y métodos	25
2.2.1 Metodología experimental	25
2.3 Resultados y Discusión	28
CAPÍTULO 3. SIMULACION RENDIMIENTO DE MATERIA SECA ACUMULADA DEL PASTO ESTRELLA (<i>C. NLEMFUENSIS</i>), ALGORITMO DE CÁLCULO Y HERRAMIENTA COMPUTACIONAL	36
3.1 Introducción.....	36
3.2 Materiales y Métodos	36
3.3 Herramientas y tecnologías de desarrollo utilizadas.	38
3.4 Resultados y Discusión:	41
CONCLUSIONES	49
RECOMENDACIONES	50
ANEXO 1.....	65

LISTADO DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

A2	Escenarios de emisiones 1, temperatura media del planeta, se eleva 2º C
ATP	Denominación química del adeno sin trifosfato
B2	Escenarios de emisiones 2, temperatura media del planeta, se eleva 4º C
CME	Cuadrado medio del error
CO2	Dióxido de Carbono
CSS	Hoja de estilo en cascada
dr	distancia relativa inversa Tierra-Sol
EE	Error estándar
g	Gramos
GEI	Gases de efecto invernadero
Gsc	constante solar = 0,082 MJ m min ⁻¹
GUI	Interfaces gráficas de usuarios
ha	Hectárea
HTML	Lenguaje de marcas de hipertexto
IDE	Entorno de desarrollo integrado
J	número del día en el año entre 1 (1 de enero) y 365 (31 de diciembre)
J2SE	Java Platform Standard Edition (Edición Estándar de la Plataforma Java)
K	Potasio
K ₂ O	Óxido de potasio
kg	Kilogramos

LISTADO DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS. CONTINUACIÓN

Km	Kilómetros
LN	Latitud norte
LVC	Lenta velocidad de crecimiento
LW	Longitud oeste
m.s.n.m.	Metros sobre nivel del mar
m ³	Metros cúbico
MS	Materia seca
N	Nitrógeno
ONU	Organización de las naciones unidas
OS	Sistema operativo
P	Fósforo
PI	Punto de Inflexión
P ₂ O ₅	Pentóxido de Fósforo
PHP	Lenguaje de programación del lado del servidor
R ²	Coeficiente de determinación
Ra	radiación extraterrestre
RMSA	Rendimiento de materia seca acumulado
SAF	Sistemas agroforestales
SGBD	Sistema de Gestión de Bases de Datos
Sign.	Significación estadística del modelo
SSP	Sistemas silvo pastoriles
t	Toneladas
Tmax	temperatura máxima del aire

LISTADO DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS. CONTINUACIÓN

T_{min}	temperatura mínima del aire
vc.	Variedad cultivada
k_{rs}	Coeficiente de ajuste (0,16...0,19)
ω_s	ángulo de radiación a la puesta del sol
φ	latitud
δ	declinación solar
ω	ángulo del tiempo solar a la mitad del período horario o inferior [rad]
%	Por ciento
% VA	Porcentaje del valor asintótico
°C	Grados Celsius

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades de las funciones matemáticas Logística y de Gompertz.....	14
Tabla 2. Estadísticos de ajuste y estimaciones de los parámetros de los modelos del rendimiento de materia seca acumulada (RMSA) con la edad de rebrote de la planta (en días)	28
Tabla 3. Estadísticos de ajuste y estimaciones de los parámetros de los modelos del rendimiento de materia seca acumulada (RMSA) con la edad de rebrote de la planta (en semanas).....	29
Tabla 4. Relación entre la edad y el rendimiento en el punto de inflexión, punto óptimo y fase de lenta velocidad de crecimiento para las diferentes dosis de N en el periodo poco lluvioso y lluvioso.	32
Tabla 5. Estadísticos de ajuste y estimaciones de los parámetros de los modelos del rendimiento de materia seca acumulada con la edad de rebrote de la planta y efectos ambientales. ¹	34
Tabla 6. Características de los escenarios de emisiones propuestos por el IPCC.....	38
Tabla 7. Escenario A2, dosis N=200, cortes cada 45 días.....	45
Tabla 8. Escenario B2, dosis N=200, cortes cada 45 días.....	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Regiones con mayor potencial para la producción de biomasa vegetal.....	22
Figura 2. Gráficos para dosis 0 de N en seca y edades en días y semanas respectivamente.	29
Figura 3. Gráficos para dosis 0 de N en lluvia y edades en días y semanas respectivamente.	30
Figura 4. Gráficos para dosis 200 de N en lluvia y edades en días y semanas respectivamente.	30
Figura 5. Gráficos para dosis 200 de N en seca y edades en días y semanas respectivamente.	31
Figura 6. Pantalla principal de la aplicación. SERPE.....	41
Figura 7. Captura información para estimar el RMSA con efecto ambiental	41
Figura 8. Captura información para estimar el RMSA sin efecto ambiental	42
Figura 9. Curvas de incrementos medio, diario y de crecimiento para el pasto estrella.	43
Figura 10. Edad óptima de cosecha del pasto estrella desde el punto de vista matemático.	44
Figura 11. Rendimiento estimado por cortes en un año.	46
Figura 12. Rendimiento por variables climáticas.	46
Figura 13. Gráfica del rendimiento por variables climáticas.....	47

INTRODUCCIÓN

La ganadería se considera una fuente de progreso importante para el desarrollo económico por ser este un sector dinámico y en fuerte crecimiento (Friedrich, 2014). En Cuba, esta actividad cobra gran importancia con la actualización del modelo económico y social y se fundamenta en la implementación del lineamiento 136 del VI Congreso del Partido Comunista de Cuba (P.C.C) con mayor énfasis en la utilización de los pastos y forrajes en la alimentación del ganado vacuno (P.C.C, 2011).

Según Herrera (2009), un gran número de investigaciones estudian el comportamiento de los sistemas de producción de esos alimentos y su uso en la alimentación animal. Estos estudios son de especial interés para encontrar métodos cuantitativos que permitan la interpretación de los principales factores que afectan su producción y de esta forma desarrollar acciones que con lleven a maximizar las producciones sin alterar la sostenibilidad de los sistemas en el tiempo (Rodríguez *et al.*, 2010).

Por otra parte, el cambio climático influye directamente sobre el crecimiento, desarrollo de plantas y cultivos, los balances hidrológicos, la frecuencia, tipo e intensidad de las siembras, así como en la severidad de la erosión de la tierra.

También afecta, entre otras variables, la disponibilidad y temporalidad de los sistemas de irrigación. Diversos estudios para distintas regiones y países han confirmado que el calentamiento global es ya un problema al que se debe prestar gran atención por sus repercusiones sobre el bienestar de los seres humanos. Los años de la última década han sido los más cálidos en los registros históricos de la temperatura mundial (PCCC, 2015) y hacia el futuro se espera que la Tierra siga presentando cambios climatológicos al modificarse los patrones de temperatura y precipitación. Algunos estudios (Adams *et a.*, 1998), han argumentado que como resultado del cambio climático se tendrían efectos adversos sobre la seguridad alimentaria ya que los rendimientos de algunos cultivos importantes disminuirían al igual que la productividad pecuaria. De igual forma se reduciría la disponibilidad de agua tanto para la agricultura como para el consumo humano.

Hasta ahora se han realizado ciertos esfuerzos para tratar de enfrentar el problema del cambio climático. En mayo de 2015, los Estados miembros de la ONU, adoptaron la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, con el objetivo último de lograr la estabilización de las concentraciones de los gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático y en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurando que la producción de alimentos no se vea amenazada y permita que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible.

No obstante, aún con las políticas actuales de mitigación de los efectos del cambio climático y con las prácticas de desarrollo sostenible que aquellas conllevan, existe evidencia abundante respecto a que las emisiones mundiales de GEI seguirán aumentando en los próximos decenios. En el caso que lo hicieran a una tasa igual o superior a la actual, el calentamiento global aumentaría y el sistema climático mundial experimentaría durante el siglo XXI cambios probablemente mayores que los observados durante el siglo XX (IPCC, 2015).

Diferentes investigaciones han aportado evidencia de que los más afectados serán los países en vías de desarrollo, que soportarán aproximadamente entre el 75% y el 80% del costo de los daños provocados por la variación del clima. Para América Latina y el Caribe, se ha encontrado que, si no se toman en cuenta los efectos de CO₂, la reducción en la producción de granos podría ser hasta de 30% bajo el escenario de mayor temperatura. Sin embargo, si dichos efectos son tomados en consideración, la producción en algunos países podría incluso incrementarse. Centroamérica y el Caribe es una región altamente vulnerable a los fenómenos climáticos y meteorológicos dada su extensión y ubicación geográfica (Banco Mundial, 2015).

Periódicamente, esta región se ve afectada por huracanes e inundaciones que impactan negativamente el desarrollo y el bienestar de sus habitantes y el desempeño de las actividades económicas. Como se documenta en Leary et

al. (2007), es muy probable que el cambio climático intensifique la gravedad de los fenómenos extremos, como los anteriores.

En este sentido, Cuba se debe preparar para enfrentar el desafío del cambio climático, de ahí que disponer de instrumentos que permitan simular situaciones caóticas para los cultivos, permitirá tomar medidas alternativas para mitigar los mismos.

Los efectos del cambio climático, han sido estudiados en las viandas, caña de azúcar, tabaco, entre otros cultivos (PCCC, 2015), pero no existen evidencias de su estudio en los pastos tropicales, específicamente en el pasto estrella (*C.nlemfuensis*).

La obtención de nuevos datos mediante la experimentación agronómica, además de generar resultados específicos para cada lugar en concreto en el espacio y el tiempo es un proceso costoso, lo que sugiere la búsqueda de otras alternativas para dar respuesta a tal situación, entre los que se enmarcan los modelos matemáticos y de simulación (Rodríguez, 2015).

Estos resultan herramientas de amplia utilización en los últimos años para lograr los objetivos propuestos. Los modelos matemáticos se utilizan en diferentes ramas del conocimiento por la posibilidad de expresar matemáticamente las relaciones entre los fenómenos (Jay, 2012). Mientras que los modelos de simulación parten de la necesidad de integrar los conocimientos en una herramienta computacional que permita entender el funcionamiento del sistema y sus componentes y faciliten la toma de decisiones acertadas (Hernández *et al.*, 2009).

La modelación y simulación del pasto estrella (*C.nlemfuensis*), constituye vía efectiva para sistematizar la información, realizar proyecciones, programaciones en los sistemas de producción ganaderos y estudiar la influencia de las variables climáticas en el rendimiento de este cultivo (Agudelo *et al.*, 2008).

Con todo lo anteriormente expuesto se llega al siguiente:

Problema Científico

¿Cuál será la respuesta del pasto estrella (*C. nlemfuensis*) a diferentes condiciones de manejo y dos escenarios climáticos diferentes: 1. Si temperatura media del planeta se eleva 2°C (A2). 2. Si temperatura media se eleva 4°C (B2)?

Hipótesis

La aplicación de la modelación y simulación en el comportamiento productivo del pasto estrella (*C. nlemfuensis*) bajo diferentes frecuencias de corte, niveles de fertilización y escenarios climáticos, brindará criterios para una utilización eficiente de la producción de forraje y permitirá diseñar estrategias para condiciones adversas de desarrollo de este cultivo.

Objetivo General

Modelar y simular el comportamiento productivo de la especie pasto estrella (*C. nlemfuensis*) bajo diferentes frecuencias de corte, niveles de fertilización y condiciones climatológicas en la producción de biomasa, que contribuya a la toma de decisiones, en condiciones climáticas adversas para el desarrollo de este cultivo.

Objetivos específicos

- ✓ Obtener base datos de las variables climáticas (temperatura máxima y mínima, precipitaciones, humedad relativa y radiación solar) de todas las estaciones meteorológicas del país en el período que comprende los años 1961 hasta 2099.
- ✓ Modelar el efecto de la frecuencia de corte, niveles de fertilización nitrogenada y variables climáticas en el rendimiento de la materia seca que permitan obtener los mejores resultados productivos.
- ✓ Simular el comportamiento productivo pasto estrella (*C. nlemfuensis*) en diferentes condiciones edafoclimáticas a través de una herramienta computacional.

Dentro de los métodos de investigación utilizados están los teóricos y empíricos.

METODOS TEÓRICOS

Histórico - Lógico

Permitió conocer la evolución y desarrollo de la modelación y simulación matemática, aplicadas al ámbito agropecuario y en particular al crecimiento de los pastos y forrajes en Cuba y la influencia de las variables climáticas en el RMSA en el pasto estrella (Hernández, 2006).

Análisis y síntesis

Con el objetivo de separar el objeto de la investigación en cada una de sus partes. Descubrir sus interrelaciones. Además de realizar un análisis de la información obtenida en las fuentes bibliográficas, así como la elaboración final de la investigación (Hernández, 2006).

Inducción–Deducción

Permitió hacer un análisis de los conceptos teóricos expuestos por diferentes autores, relacionados con la modelación, simulación y desarrollo de software, donde se establece la relación entre lo singular, particular y general (Hernández, 2006).

Tránsito de lo abstracto a lo concreto

Permitió evaluar los cambios efectuados en el proceso de investigación y como se reflejan estos en el tema a investigar (Hernández, 2006).

METODOS EMPÍRICOS

Investigación bibliográfica

Revisión bibliográfica acerca de la influencia de las variables climatológicas en el rendimiento de biomasa y su vinculación con la modelación y simulación matemática (Hernández, 2006).

Análisis documental

Permitió realizar un análisis de los documentos encontrados durante el proceso de búsqueda relacionado con el tema de investigación en la revisión bibliográfica, como parte de la fundamentación teórica y en el análisis de la influencia de las variables edad, precipitación más riego y radiación en el rendimiento de biomasa. (Hernández, 2006)

Novedad científica

La novedad científica de este trabajo radica en que se realiza la modelación y simulación del comportamiento productivo del pasto estrella (*C. nlemfuensis*) bajo diferentes frecuencias de corte, niveles de fertilización y condiciones edafoclimáticas para apoyar la toma de decisiones en su utilización más eficiente en condiciones adversas de desarrollo.

Aporte científico

Los resultados de esta tesis permiten:

1. Obtener base de datos sobre algunas variables meteorológicas (temperaturas máximas y mínimas, precipitaciones, humedad relativa y radiación solar) en dos escenarios diferentes: que la temperatura de la tierra se eleve dos grados centígrados y que la temperatura de la tierra se eleve cuatro. En un período que comprende los años 1961 hasta el 2099. Esta base de datos puede ser utilizada para estimar los efectos del cambio climático en otros cultivos.
2. Modelos matemáticos de mejor ajuste para describir el comportamiento productivo del pasto estrella (*C. nlemfuensis*) bajo diferentes condiciones de manejo y determinar valores notables para estas funciones.

3. Obtener una herramienta computacional para simular el rendimiento del pasto estrella bajo diferentes condiciones edafoclimáticas.

Aporte teórico

El aporte teórico está sustentado sobre la base de la información que se brinda en este trabajo sobre la aplicación de la modelación en las investigaciones realizadas en el Instituto de Ciencia Animal con el pasto estrella (*C. nlemfuensis*), proporciona una herramienta de trabajo útil en la utilización de esta técnica como complemento de los estudios realizados en este cultivar.

Aporte práctico

Radica en que se obtendrá un software mediante el cual, se podrá estimar el comportamiento productivo de la especie pasto estrella (*C. nlemfuensis*) bajo las condiciones de estudio para auxiliar en la toma de decisiones a investigadores, profesores, estudiantes y productores y contribuir a su eficiente utilización.

Estructura de la tesis

La tesis está estructurada en introducción y tres capítulos, con sus respectivos epígrafes; de los cuales se ofrece un resumen del contenido abordado en cada uno de ellos:

Capítulo 1: Fundamentos teóricos y métodos lógicos relacionados con la modelación y simulación matemática, características edafoclimáticas del pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis*), influencia del clima en el rendimiento de materia seca y curvas de crecimiento aplicadas a pastos y forrajes en el país.

Capítulo 2: Se verifica la aplicabilidad del modelo de Gompertz para ambas épocas del año y se extiende su estudio a la determinar las tasas de incremento corriente e incremento medio de la planta, además se utilizan las curvas de acumulación de biomasa de un trabajo de la literatura.

Capítulo 3: Se simula el RMSA, con efectos climáticos, así como, se obtiene una herramienta computacional que facilita el trabajo de investigadores y directivos en la toma de decisiones antes los escenarios **A2** y **B2**.

El trabajo cuenta además con conclusiones, recomendaciones y bibliografía.

CAPÍTULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**1.1 Modelo matemático**

Según Thornley y France (2007), Rykov *et al.* (2010), Dey *et al.* (2011) y Jay (2012) un modelo es la representación simplificada del mundo real, en los cuales se destacan características relevantes del fenómeno en estudio. Para Aduriz-Bravo (2012) y Cuevas (2014), modelo es la representación ideal de un sistema y la forma en que este opera, cuyo objetivo es analizar o predecir el comportamiento futuro.

En general “modelo” no es más que una representación de los mecanismos que gobiernan un fenómeno natural. 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.

Entre las definiciones de modelo matemático, se encuentran las propuestas por León-Velarde y Barrera (2003), Thornley y France (2007) y Sokolowsky (2010). Los mismos consideran que son ecuaciones o conjuntos de ecuaciones que representan el comportamiento de un sistema. Una muestra de ello, se encuentra en los trabajos de Gwayumba *et al.* (2002), Dijkstra *et al.* (2008) y Antignani (2014) relacionados con la producción de leche y el consumo de alimento, otros con el crecimiento y el papel de la proteína y la energía en el proceso (Malhado *et al.*, 2008; Karlsson *et al.*, 2009), entre otros.

Para León-Velarde y Barrera (2003) los modelos matemáticos describen relaciones entre variables y parámetros y de forma general son representaciones de las características importantes de un sistema para sintetizar el conocimiento científico.

Debido a la cantidad y diversidad de modelos, se han realizado diferentes clasificaciones.

Según Krishna (2005) y Freund *et al.* (2006) los modelos pueden clasificarse en:

Empíricos, mecanísticos y de simulación. Candelaria *et al.* (2011), los clasifican como: estáticos, dinámicos, determinísticos y estocásticos.

La presente investigación se enmarcó en el uso de modelos empíricos y de simulación, puesto que se utilizó información experimental para combinar de forma armónica las ecuaciones que predicen el rendimiento de materia seca del pasto y su valor nutritivo, en una herramienta computacional (Gálvez *et al.*, 2010; Dos Santos *et al.*, 2011).

Para Ortiz (2000) la metodología para la obtención de un modelo se denomina modelación matemática.

1.2 Modelación matemática

Según Ursul *et al.* (1981); Thornley y France, (1984); Ortiz (2000); Fernández (2004); Davison (2008); Torres *et al.* (2009) y Domínguez (2012), la modelación matemática tiene carácter de método científico general, cuyas bases están en las conquistas de la matemática, la cibernética y el enfoque sistémico en la investigación científica.

Menchaca (1978); Torres y Ortiz (2005); Gallardo (2008); Álvarez *et al.* (2012) y Vázquez (2012) aplicaron la modelación en el campo de las ciencias agropecuarias, sus trabajos estuvieron dirigidos a la estimación y evaluación de parámetros genéticos, productivos, reproductivos, ambientales, sociales, entre otros para su incorporación a los sistemas prácticos, como vía de apoyo en la toma de decisiones y en la predicción de escenarios futuros (Cailliez, 1980; Hernández *et al.*, 2009).

Por otra parte, Karadavut (2009); Vela y Vargas (2009); Ramírez *et al.* (2011); Timothy *et al.* (2012) y Calzada *et al.* (2014) plantearon que los recientes avances en la modelación del crecimiento y desarrollo de las plantas propician las bases para la obtención de conocimientos sobre el manejo eficiente de los pastos y forrajes como vía para mejorar la productividad animal.

La modelación ocurre cuando se ajustan datos experimentales a un modelo, proceso que se realiza por medio del análisis de regresión.

Di Rienzo (2011), definió el análisis de regresión y planteó que su objetivo radica en determinar la ecuación o ecuaciones que relacionan las variables del modelo y estimar el valor de sus parámetros.

Montgomery *et al.* (2005) esbozó que en la regresión lineal existe una relación lineal entre los parámetros y las variables predictoras, mientras que en la no lineal existen relaciones no lineales entre ellos.

Burguillo (2005); Bingham y Frees (2010) expresaron que el método de los mínimos cuadrados se encuentra entre los que más se emplean en la estimación de parámetros en la regresión lineal, mientras que en regresión no lineal, se utilizan algoritmos iterativos como el método de Levenberg-Marquardt.

Chacín (1998), Kiviste *et al.* (2002), Guerra *et al.* (2003), Torres *et al.* (2012) y Domínguez *et al.* (2013) propusieron diversos criterios estadísticos para la selección de modelos, entre los que se encuentran:

- Coeficiente de determinación R^2 : declara que proporción de la variación de la variable dependiente es explicada por las variables predictoras.
- Coeficiente de determinación ajustado (R^2_{aj}): es una corrección o ajuste del coeficiente de determinación original de acuerdo a los grados de libertad del modelo.
- Cuadrado medio del error (CME): informa sobre la precisión de las estimaciones.
- Prueba de significación de los parámetros: determina la significación estadística de los parámetros del modelo.
- Error estándar de los estimadores de los parámetros: permite determinar los intervalos de confianza para los parámetros.
- Error medio en valor absoluto: da una idea de la magnitud media de los errores independientemente de su signo.

- Error estándar de la estimación: muestra la desviación normal de los residuos y puede utilizarse para la predicción de nuevas observaciones.
- Análisis gráfico de los residuos: Comportamiento de los residuos obtenidos de la diferencia entre los valores observados y los valores predichos por el modelo.
- Diferencia agregada o Sesgo: evalúa la desviación media de los residuos del modelo respecto a los valores observados. El signo del error de predicción promedio expresa si la función examinada sobrestima (-) o subestima (+) el valor de los datos analizados.

(Fernández, 2004) empleó modelos estadísticos - matemáticos en el análisis de la curva de lactancia y factores que la afectan en el genotipo Siboney de Cuba. Esta misma autora planteó que la modelación se utiliza como un instrumento común en el estudio de sistemas de diversas características y está considerada como un elemento indispensable en la investigación científica

Madden (1980); Ribeiro (2005) y Thormley y France (2007), plantearon que diversos modelos se utilizan para describir el crecimiento de una parte o de toda la vida de un organismo vivo a través del tiempo.

En el campo de la producción agropecuaria, Barker *et al.* (2010) y Timothy *et al.* (2012) plantearon que son de considerable aplicación en la descripción de procesos biológicos específicos del crecimiento y desarrollo de las plantas y en el estudio de las distintas etapas del mismo.

El crecimiento de una planta o animal describe una curva de tipo sigmoide y puede expresarse a través de su peso o altura.

Según Crespo *et al.* (2006) en el caso del crecimiento de las plantas se distinguen tres fases o estados biológicos:

Primera fase: Es lenta y su duración depende de la especie y del grado de intensidad con que la gramínea es desfoliada, se le denomina fase logarítmica.

Segunda fase: El crecimiento ocurre relativamente constante y expresa la tasa de máximo crecimiento del cultivo. Su duración depende de la especie de gramínea.

Tercera fase: Predomina la pérdida de materia seca y la mayor acumulación de tallos, inflorescencia y material muerto en el pastizal.

Barker *et al.* (2010) describieron cuatro estadíos del crecimiento de las plantas que no están en contradicción con la descripción anterior.

Casas *et al.* (2010), plantearon que el uso de funciones de crecimiento es mayormente empírico y de él pueden derivarse algunas características importantes del crecimiento.

Según Thornley and France (2007) y Noguera (2008), entre las funciones que más se utilizan para modelar el crecimiento se encuentran Exponencial, Monomolecular, Logística Gompertz, Chanter, Von Bertalanffy, Richards, Schumacher, entre otras.

Nobre *et al.* (2003) y Casas *et al.* (2010) plantearon que las funciones de Gompertz y Logística son las de uso más frecuente en el análisis del crecimiento de animales y plantas.

Domínguez *et al.* (2013) y La O (2013) abordaron el análisis del crecimiento en animales. Sin embargo Ruíz *et al.* (2012) plantearon que los trabajos relacionados con el crecimiento de las plantas son limitados a pesar de la importancia de la modelación del crecimiento de los cultivos, en especial de los pastos y forrajes.

Kiviste *et al.* (2002) y Casas *et al.* (2010) plantearon que las funciones de crecimiento, pueden ofrecer parámetros de interés matemático y biológico tales como: Asíntota horizontal que es el valor que toma la variable en estudio cuando el tiempo (edad) tiende a infinito (parámetro A). Punto de inflexión (PI): punto donde cambia la concavidad de la función, coincide con la tasa de crecimiento máxima.

Las propiedades de las funciones Logística y de Gompertz se ilustran en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de las funciones matemáticas Logística y de Gompertz

Propiedades	Logística	Gompertz
Ecuación	$W_{(t)} = \frac{A}{1 + be^{-ct}}$	$W_{(t)} = Ae^{-be^{-ct}}$
Número de constantes	3	3
Simetría	Simétrico	Asimétrico
Asíntota (peso maduro o adulto)	$\lim_{t \rightarrow \infty} W = A$	$\lim_{t \rightarrow \infty} W = e^A$
Inflexión	$t = \frac{b}{c} ; W = \frac{A}{2}$	$t = \frac{b}{c} ; W = \frac{A}{e}$
Incremento corriente diario	$\frac{dW}{dt} = \frac{Abce^{-ct}}{(1 + be^{-ct})^2}$	$\frac{dW}{dt} = bcWe^{-ct}$
Incremento medio diario	$\frac{W}{t} = \frac{A}{t + tbe^{-ct}}$	$\frac{W}{t} = \frac{Ae^{-be^{-ct}}}{t}$

Fuente: tomado de (Winsor, 1932)

El uso de estas funciones matemáticas en la modelación de la dinámica de acumulación de biomasa del pasto estrella (*C. nlemfuensis*), será esencial en la descripción, estimación y predicción del comportamiento de esta planta en diferentes condiciones de manejo

Gálvez *et al.* (2010) plantearon que el desarrollo de métodos relacionados con la estimación de los rendimientos agrícolas cobra gran importancia y en ellos tienen un papel central los métodos estadísticos y el desarrollo de software o modelos de simulación.

Según Boote *et al.* (1996) y Hernández *et al.* (2011) estos tienen varias aplicaciones en la investigación entre las que se encuentran la optimización de prácticas de manejo tales como, selección de variedades, época de siembra,

uso del riego y la fertilización, momento para el aprovechamiento del cultivo, entre otros. También permiten abordar aspectos relacionados con la variabilidad del clima y su impacto sobre la productividad de los cultivos (Royce *et al.*, 1998).

Entre los softwares para la simulación de cultivos se encuentran Blue Grama (Hanson *et al.*, 1988); Grazplan (Thornley y Verberne, 1989); Century (McKeon *et al.*, 1990), Grasmol (Moore *et al.*, 1991); Hurley Pasture Model (Van de Ven, 1992); Grasp (Parton *et al.*, 1993), CropSyst (Stöckle *et al.*, 2003), Planificación Forrajera (Grenón, 2005) y el DSSAT (Giraldo, 1998; Jones, 2003; Thorp *et al.*, 2008), este último es más el utilizado.

Sin embargo, estos son softwares comerciales y en ocasiones resultan de difícil acceso por sus elevados precios, requieren de entrenamientos para su utilización, deben calibrarse para ajustarse a condiciones específicas y no siempre los usuarios finales poseen la información que ellos demandan para las simulaciones. En general no incorporan aspectos de la respuesta animal.

En resumen, los modelos de simulación constituyen herramientas de gran valor para el desarrollo y evaluación de estrategias en la investigación y la producción y sirven de apoyo en la toma de decisiones. El empleo de estos modelos permitirá profundizar en el estudio de las características del crecimiento de los forrajes en relación con otros factores que influyen en su comportamiento.

1.3 Aplicaciones de la modelación y simulación matemática en la producción de pastos y forrajes en Cuba.

Las aplicaciones de la modelación tuvieron sus inicios en los trabajos de Del Pozo y Herrera (1995), Del Pozo (1998) y Torres *et al.* (1999) en pasto estrella (*C. nlemfuensis*). Estos autores encontraron relaciones polinómicas entre las variables, sin embargo, en estos modelos los parámetros no tienen interpretación biológica.

Ortiz (2000), realizó la modelación y simulación del reciclaje de los nutrientes N, P y K en el sistema suelo, planta, animal. Más adelante García *et al.* (2009),

estudiaron la dinámica de crecimiento de Mombaza (*P. Maximum*); Díaz (2007), Martínez *et al.* (2010), Rodríguez *et al.* (2011), Fortes (2012) y Rodríguez *et al.* (2013), estudiaron la dinámica de acumulación de biomasa del kinggrass (*P. purpureum*) o de algunos de sus clones con el empleo de modelos no lineales, sin embargo en su generalidad solo se abordó el tema orientado a la bondad de ajuste del modelo y no a la interpretación biológica de los resultados.

Ramírez (2010), en cultivares de *Brachiaria*, *Panicum* y *Pennisetum* y Ruíz, *et al.* (2012) en variedades de *Tithonia diversifolia* evaluaron diferentes modelos y encontraron ajustes lineales para las variables en estudio.

Se puede apreciar que son escasos los trabajos relacionados con el tema de la modelación y simulación de la producción de pastos y forrajes en el país, y aunque existen modelos especializados que se puedan utilizar como elemento de partida, es necesario desarrollar modelos adaptados a nuestras condiciones que puedan servir como herramienta útil en la toma de decisiones.

Las consideraciones anteriores son de gran importancia en la presente investigación cuya finalidad será la modelación de la acumulación de biomasa del pasto estrella *C. nlemfuensis* y la obtención de un programa computacional para predecir, el potencial de producción que se puede alcanzar con esta planta forrajera. A continuación, se expondrá una breve caracterización de esta especie.

1.4 Descripción del pasto estrella (*C. nlemfuensis*).

Esta especie en Cuba se ha adaptado 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⁻¹año⁻¹ promediando alrededor de 16,5. Mostró susceptibilidad al ataque del falso medidor (Ramos, 1983).

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⁻¹año⁻¹).

El clima, edad de cosecha, características del suelo, el riego, entre otros, se encuentran entre los factores que influyen en la producción de biomasa y calidad por lo que cualquier trabajo enfocado a la modelación del rendimiento, debe considerar los factores anteriores y sus interacciones (Ramos, 1983).

Clima

Crespo (1981) planteó que el clima es uno de los factores que más inciden en la producción y calidad de los pastos.

La radiación solar es la fuente de energía para todos los procesos físicos en la tierra. Esta energía influye en el desarrollo de la planta al facilitar la ejecución de los procesos químicos mediante la fotosíntesis.

Cooper (1970) y Deinum (1971) han planteado que los pastos tropicales necesitan mayor cantidad de luz para la producción de materia seca. Sin embargo, el elevado consumo de la energía solar produce evotranspiración intensa y en consecuencia podría deprimir la producción vegetal.

Las temperaturas es un término cualitativo que expresa la cantidad de calor disponible para el desarrollo de la planta. Se ha visto que el incremento de la temperatura aumenta la transpiración, con la consiguiente pérdida de agua. El mayor transporte, por lo general ocurre en un rango entre 20 y 30 °C.

Se ha podido determinar que el mayor desarrollo de los pastos tropicales ocurre entre 30 y 35 °C, donde se producen una mayor elongación de los tallos, un aumento de la producción de materia seca, una disminución del porcentaje de hojas y de la digestibilidad (Deinum y Dirven, 1976).

Sin embargo, una disminución de la temperatura produce efectos negativos en la producción del pasto, aunque mejore su calidad y digestibilidad.

En el clima de Cuba se observan dos estaciones climáticas bien definidas. El período lluvioso (mayo-octubre) que se caracteriza por elevadas precipitaciones y temperaturas y el poco lluvioso (noviembre-abril) determinado

por la disminución cuantitativa de las lluvias, bajas temperaturas y menor duración de los días.

La característica general de bajo rendimiento de los pastizales durante la época poco lluviosa requiere del estudio de los factores climáticos en combinación con las especies de pastos, su manejo y las características del suelo.

Cooper (1970) planteo, que las mayores limitaciones en el rendimiento de los pastos dependen de la falta de humedad del suelo, temperatura, disponibilidad de nutrientes del suelo, característica de la especie y el manejo practicado por los hombres.

Edad de la cosecha

Varios investigadores han señalado la disminución progresiva que experimenta la calidad de los pastos cuando la frecuencia de defoliación se alarga. Por otra parte, Funes (1977) al estudiar la curva de crecimiento del pasto estrella, encontró un aumento de la longitud y grosor de los tallos, mayor área individual de las hojas, mayor incidencia de hijos muertos y una progresiva disminución de la relación tallo hojas al disminuir la frecuencia de cortes.

La frecuencia de cortes, parece afectar directamente la proporción entre los diversos órganos de las plantas.

De forma aislada se encontraron trabajos que relacionaron el rendimiento con la edad de corte (Del Pozo, 1995), que explicaron el crecimiento del cultivo, con la utilización de modelos polinomiales, sin embargo, este tipo de modelos no permiten la interpretación biológica de sus parámetros.

La determinación de un intervalo óptimo de explotación tiene gran importancia, porque contribuye a la mejor utilización de los pastos y forrajes y a la obtención de resultados económicos favorables en la producción de leche y carne.

Riego

Durante el período poco lluvioso de las regiones tropicales, donde las precipitaciones son escasas y muy erráticas, la producción intensiva de pastos y forrajes requiere la aplicación de fertilizantes y riego (Ramos, 1983).

Fertilización

Según Cabrera *et al.* (2009), las gramíneas que se utilizan en sistemas de corte son altamente demandantes de nutrientes, principalmente de N el cual es uno de los elementos más importantes que determina el nivel de producción de forraje por unidad de superficie.

Según Fortes (2012) los nutrientes, que en mayor cantidad se requieren son el Nitrógeno (N), Fósforo (P) y el Potasio (K). Otros nutrientes secundarios son: calcio, azufre y magnesio.

Herrera *et al.* (1981), encontraron respuesta lineal positiva del RMS en otra gramínea como el kinggrass, con el incremento de la dosis de N (0, 100, 300, 500, 800).

Efecto del cambio climático

El cambio climático es una amenaza al desarrollo sostenible debido a la reducción de las áreas forestales, la pérdida de la biodiversidad, los eventos hidrometeorológicos más frecuentes e intensos, la pérdida de la agro productividad, la reducción de las áreas de cultivo, la reducción de la calidad y la disponibilidad del agua, la afectación de los manglares y los ecosistemas costeros, y el incremento de la vulnerabilidad de los asentamientos costeros.

América Latina y el Caribe sufren las afectaciones del cambio climático en las zonas rurales; no obstante, en diferentes foros se han debatido los resultados y las experiencias sobre el manejo de los sistemas agroforestales/ sistemas silvo pastoriles (SAF/SSP) por la biodiversidad que generan. La conservación de la biodiversidad y la producción ganadera están basadas en los conceptos de diversidad funcional, donde las especies encontradas, manejadas y no

manejadas, contribuyen a la provisión de servicios ecosistémicos valorados por los productores (Clerck, 2010).

El empleo de diferentes especies arbóreas en bancos forrajeros proteínicos es una práctica en Colombia como estrategia de alimentación en la sequía (Sinisterra et al., 2010). En Argentina se emplean los sistemas agroforestales integrados, con producción de madera y bancos forrajeros para la alimentación del ganado en las mismas áreas (Esquivel y Lacorte, 2010). En Cuba, por más de 20 años, se han alcanzado resultados satisfactorios en la investigación y en la producción con diferentes especies animales (Lamela *et al.*, 2009; Simón et al., 2010).

El cambio climático se ha manifestado con un aumento de la temperatura diaria, aunque otros parámetros climáticos se han alterado, como la precipitación, tanto en la distribución como en su intensidad a través del año. En las zonas tropicales húmedas, la radiación solar incidente sobre la superficie del suelo también se altera, debido al incremento de la nubosidad.

La suma de dichos cambios climáticos altera la fisiología y la fenología de los seres vivos, cambia su comportamiento natural, que se manifestó, por ejemplo, con mayores variaciones interanuales en las cosechas de algunos árboles frutales o bien la menor radiación solar incidente sobre los pastos, que los hace crecer lentamente, al limitar la fotosíntesis (Abarca, 2013).

El vínculo entre el cambio climático y las lluvias extremas está claramente establecido como señaló Abarca (2013). Con el calentamiento global, cercano a un grado centígrado, las lluvias ya aumentaron 15 % en las regiones tropicales y su cantidad e intensidad podrían incrementarse entre 30 y 60 por ciento en las próximas décadas (Leahy, 2013).

Aunque resulte toda una conmoción, ya es demasiado tarde para impedir que se dupliquen las olas de calor para 2020 y que se cuadrupliquen para 2040, concluye el estudio publicado en la revista *Environmental Research Letters* 2013.

Si la temperatura del planeta aumenta entre dos a cuatro grados centígrados, como se prevé, las regiones tropicales de América Latina experimentarán inundaciones catastróficas con mayor regularidad.

Esta se trata de la primera investigación en usar observaciones de 8326 estaciones meteorológicas de todo el mundo, para determinar que la intensidad de las lluvias extremas aumenta con mayores temperaturas (Leahy, 2013).

Hacer que árboles, pastos y plantas sigan siendo parte del paisaje es extremadamente efectivo, tanto para limpiar como para retener el agua, además de reducir la sedimentación que obstruye vías fluviales, lo cual a menudo empeora las inundaciones.

La naturaleza puede ofrecer la mejor solución para controlar el aumento de las inundaciones que se esperan en las zonas tropicales. Los bosques y los pantanos absorben las lluvias fuertes y ralentizan su liberación corriente abajo.

Esto hará que en las zonas húmedas se tengan que recalcular las tasas de producción de biomasa de los forrajes (Figura 1), para poder modificar el período de descanso más apropiado de las pasturas, conservar forrajes para el período de seca o temporada (noviembre a enero) y proporcionar albergue transitorio para los animales, contra el clima adverso.

En las zonas secas es clave la conservación de forrajes, en las formas de heno, henolaje, ensilaje, hornos forrajeros y forrajes amonificados, para suministrarlos a los animales entre los meses de octubre a mayo. Se deberá proporcionar sombra natural, preferiblemente, a los animales durante todo el año, para reducir la temperatura ambiental y proporcionarles así mayor bienestar.

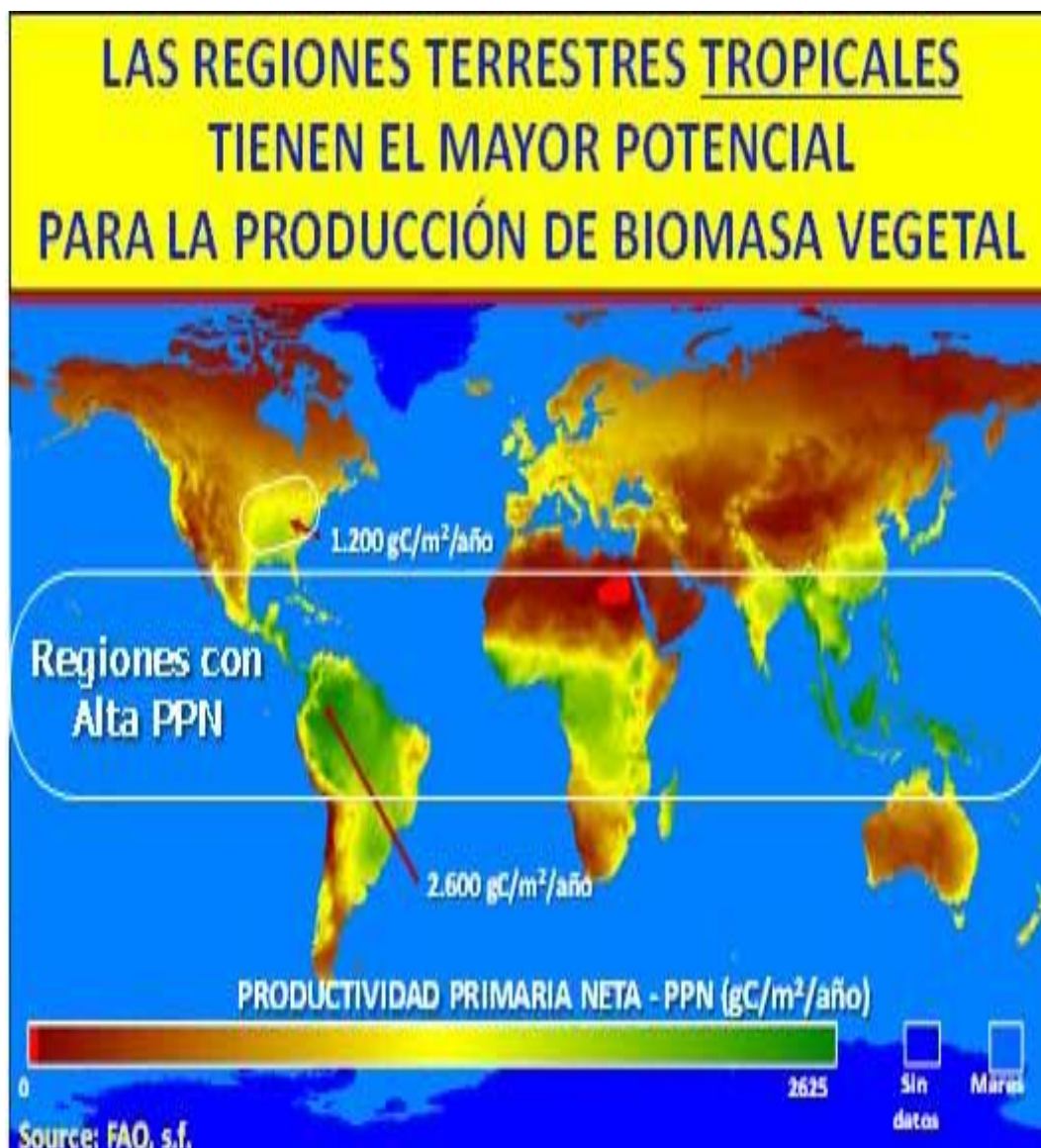


Figura 1: Regiones con mayor potencial para la producción de biomasa vegetal.

A modo de resumen de este capítulo, se plantea que ante el hecho de un crecimiento vertiginoso de la población tanto humana como animal, por la globalización, las actividades del hombre, erupciones volcánicas, vendavales, sequías, incendios forestales, inundaciones, granizadas inusuales, inviernos cruentos, el efecto invernadero, el calentamiento global, el cambio climático, terremotos, tsunamis, lluvia ácida y radioactiva, aves migratorias, entre otras razones, son las causas para que exista una justificada preocupación a nivel mundial, continental, regional y local, tanto de las autoridades gubernamentales, como de la población en general, por lo que pueda ocurrir con la salud.

Estas y muchas otras causas están favoreciendo la globalización de enfermedades emergentes y reemergentes de alto riesgo para la salud humana y animal, de ahí que a nivel mundial se debe esperar lo inesperado: el cambio de conducta de las enfermedades y no debe olvidarse que el 60% de los patógenos humanos son transmitidos por animales.

Por otra parte, el empleo de la modelación matemática en los trabajos que abordaron esta temática fue limitado. De ahí, que sería oportuno la utilización de estas técnicas para la estimación de dosis óptimas de fertilizantes, edades óptimas de cosecha, entre otros, ante estos escenarios que se avecinan.

El uso de modelos de regresión no lineal en el estudio de los pastos y forrajes cobra importancia gracias a su capacidad para la explicación de procesos biológicos. El desarrollo de técnicas de cómputo reduce el tiempo requerido para la estimación de parámetros. Sin embargo, en este campo aún se investigan los modelos de mejor ajuste para estimar la acumulación de biomasa en diferentes variedades de pastos y forrajes e incluir variables climáticas con este fin.

CAPÍTULO 2. MODELACIÓN DE LA DINÁMICA DE ACUMULACIÓN DE BIOMASA EN PASTO ESTRELLA (*C. NLEMFUENSIS*). EFECTO DE ÉPOCA

2.1 Introducción

Las curvas de crecimiento de diferentes variedades de interés para la ganadería, son herramientas importantes para la investigación y toma de decisiones en las empresas pecuarias. El uso adecuado de ellas puede generar e implementar programas que ayuden a identificar parámetros de interés económico y productivo (Agudelo *et al.*, 2008; Santana *et al.*, 2010), que permitan aumentar la eficiencia y productividad de este sector.

Las curvas de crecimiento de Gompertz y Logística se encuentran entre las que más se utilizan para describir el crecimiento de las plantas (Gregorczyk, 1991; Barker *et al.*, 2010).

En Cuba, Del Pozo y Herrera (1995) ajustaron curvas de crecimiento con efectos ambientales a través de un modelo multiplicativo, en esta variedad. Por otra parte, Del Pozo (1998), ajustó curvas de crecimiento para el pasto estrella (*C. nlemfuensis*), a través de modelos polinomiales de segundo grado para los períodos lluvioso y poco lluviosa. Estas funciones tienen como principal inconveniente, que no tienen un comportamiento asintótico y sus parámetros no tienen interpretación biológica.

Rodríguez (2015) ajustó curvas de crecimiento en diferentes condiciones de manejo para el kinggrass (*Pennisetum Purpureum* Schum) para los períodos lluvioso y poco lluvioso en experimentos realizados en un período de cinco años con buenos ajustes.

El objetivo de este capítulo fue verificar la aplicabilidad del modelo de Gompertz para ambas épocas del año y extender el estudio a la determinación de las tasas de incremento corriente e incremento medio de la planta, utilizar las curvas de acumulación de biomasa obtenidas por Del Pozo y Herrera (1995) a otras condiciones de manejo.

2.2 Materiales y métodos

2.2.1 Metodología experimental

Se utilizó la información proveniente de investigaciones desarrolladas durante un año en el centro experimental “Miguel Sistach Naya” perteneciente al Departamento de Pastos y Forrajes del Instituto de Ciencia Animal, situado en San José de las Lajas, provincia Mayabeque, Cuba, entre los 22° 53′ LN y los 82° 02′ LW, a 92 msnm

El experimento se desarrolló en un suelo Ferralítico Rojo compactado (ISACC, 1978), bastante uniforme en todo su perfil y de rápida desecación (Anon, 1994).

Se utilizó un área de pasto estrella previamente establecida, con más del 95% de pureza dividida en parcelas experimentales, con un área cosechable de 10 m².

Durante el período experimental (mayo 1992-abril 1993) se aplicó una fertilización basal de 100 y 200 kg ha⁻¹ año⁻¹ de P₂O₅ (superfosfato triple) y K₂O (óxido de potasio), respectivamente y se distribuyó al 50% al inicio de cada estación del año. El nitrógeno (nitrato de amonio) se fraccionó a razón de 50 kg ha⁻¹ por cada ciclo de crecimiento (equivalente a 200 kg N ha⁻¹ año⁻¹), dosis en la cual se obtienen las mayores respuestas en términos de kg MS kg⁻¹ N aplicado en los suelos rojos (Ramos *et al.*, 1979; Ramos *et al.*, 1995). En el período seco se aplicó riego por aspección a razón de 500 m³ ha⁻¹ cada 21± 3 días.

Previo al inicio de cada ciclo experimental las parcelas se cortaron con una segadora para uniformar el rebrote y entre estos se ofreció un período mínimo de tiempo que garantizara, de conjunto con la distribución aleatoria de las edades dentro de cada réplica, que el corte de las parcelas se efectuara nunca antes de seis semanas de reposo en cada tratamiento entre ciclos de crecimiento.

Antes del corte en cada semana se cosecharon 10 plantas previamente marcadas al azar por tratamiento en cada réplica. En sus hojas se midió el

largo desde la lígula hasta el ápice por el haz y el ancho en el punto medio longitudinal y en sus tallos, el largo del diámetro en los entrenudos definidos.

En el experimento original, se utilizó un diseño en parcelas divididas con tres replicas donde el nivel de N constituyó la parcela principal (0, 200 y 400 kg de N ha⁻¹ año⁻¹) y las subparcelas las edades desde 1 hasta 12 semanas.

Análisis matemático

Se emplearon dos modelos de regresión no lineal cuyas expresiones son las siguientes:

Gompertz

$$W_{(t)} = Ae^{-be^{-ct}} + \varepsilon$$

Modelo multiplicativo con efectos ambientales (Del Pozo y Herrera 1995)

$$W_{(t)} = A e^{(dt+ft^2+gt^3)}YZ + \varepsilon$$

Dónde:

$W_{(t)}$: Variable dependiente que representa la acumulación de biomasa en el tiempo.

A, b, c, d, f, g: son parámetros de los modelos.

t: es la variable independiente y representa el tiempo medido en días o semanas.

Y: efecto de la radiación.

Z: efecto de la precipitación.

ε : es error aleatorio, normalmente distribuido con media cero y varianza constante.

Para el modelo multiplicativo con efectos ambientales, se impusieron las siguientes restricciones adicionales (Del Pozo y Herrera 1995):

$$\sum_k^n Z_k = \sum_j^n Y_j = 1$$

Se comprobó el cumplimiento de los supuestos teóricos del modelo de regresión según Montgomery *et al.* (2005).

El comportamiento de las tasas de acumulación de biomasa de la variedad se describió, mediante las curvas de evolución en el tiempo del incremento corriente diario (ICD) y del incremento medio diario (IMD) según Kiviste *et al.* (2002), las cuales se definen como:

$$ICD = \frac{dW}{dt}$$

$$IMD = \frac{W}{t}$$

Se determinó el punto de inflexión y el momento adecuado para la utilización de la planta por medio de las ecuaciones siguientes:

$$\frac{d^2W}{dt^2} = \left[\frac{\ln(b)}{c}; \frac{a}{e} \right]$$

Punto de inflexión

Momento de utilización de la planta

$$te^{-ct} = \frac{1}{bc}$$

El porcentaje del valor asintótico del rendimiento (% VA) para decidir hasta que edad sería razonable evaluar la curva de acumulación de la planta, se calculó como:

$$\% VA = \frac{RMSA_{(edad\ de\ rebrote)}}{A} * 100$$

El procesamiento de la información se realizó con apoyo de los paquetes estadísticos InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2012) y Statgraphics Plus (Anon, 1995).

2.3 Resultados y Discusión

Modelación de las curvas de acumulación de biomasa de pasto estrella (*C. nlemfuensis*), con la edad de rebrote de la planta

En las tablas 2 y 3 se presentan los criterios estadísticos del modelo (Gompertz) en ambos períodos estacionales, para edades expresadas en días y semanas respectivamente.

Los modelos explicaron alta variabilidad entre el RMSA y las edades de rebrote, con valores superiores al 99 % en el período lluvioso y poco lluvioso, en cada dosis de N (0 y 200). El CME, EE y Sesgo fueron pequeños lo cual repercutió en los elevados valores de significación de los modelos y sus parámetros.

Tabla 2. Estadísticos de ajuste y estimaciones de los parámetros de los modelos del rendimiento de materia seca acumulada (RMSA) con la edad de rebrote de la planta (en días)

Período	Dosis N	R ² (%)	CME	EE	Sesgo	Sign. modelo	A	b	c
Lluvioso	0	99,39	0,004	0,07	0,007	P<0,001	2,62 ±0,13 P<0,001	6,52 ±0,91 P<0,001	0,05 ±0,0046 P<0,001
	200	99,90	0,005	0,06	0,004	P<0,001	6,06 ±0,1 P<0,001	4,55 ±0,2 P<0,05	0,05 ±0,0017 P<0,001
Poco lluvioso	0	99,57	0,001	0,03	0,001	P<0,001	1,37 ±0,03 P<0,001	3,64 ±0,72 P<0,001	0,04 ±0,0005 P<0,001
	200	99,34	0,007	0,08	0,004	P<0,001	3,92 ±0,33 P<0,001	3,81 ±0,31 P<0,001	0,03 ±0,004 P<0,001

En día

Tabla 3. Estadísticos de ajuste y estimaciones de los parámetros de los modelos del rendimiento de materia seca acumulada (RMSA) con la edad de rebrote de la planta (en semanas)

Período	Dosis N	R ² (%)	CME	EE	Sesgo	Sign. modelo	A	b	c
Lluvioso	0	99,42	0,005	0,07	0,007	P<0,001	2,62 ±0,13 P<0,001	6,52 ±0,91 P<0,001	0,33 ±0,03 P<0,001
	200	99,34	0,007	0,08	0,004	P<0,001	6,06 ±0,1 P<0,001	4,55 ±0,2 P<0,05	0,32 ±0,01 P<0,001
Poco lluvioso	0	99,32	0,04	0,20	0,001	P<0,001	1,37 ±0,05 P<0,001	3,64 ±0,27 P<0,001	0,3 ±0,02 P<0,001
	200	99,34	0,007	0,08	0,004	P<0,001	3,92 ±0,33 P<0,001	3,81 ±0,31 P<0,001	0,22 ±0,03 P<0,001

En semana.

En las figuras desde la 2 hasta 5, se muestran los gráficos de los residuos para las dosis 0 y 200 de N y edades expresadas en días y semanas. Se aprecian que en todos los casos, existen pocas desviaciones de los puntos respecto de la diagonal principal lo que confirma la hipótesis de normalidad de los residuos.

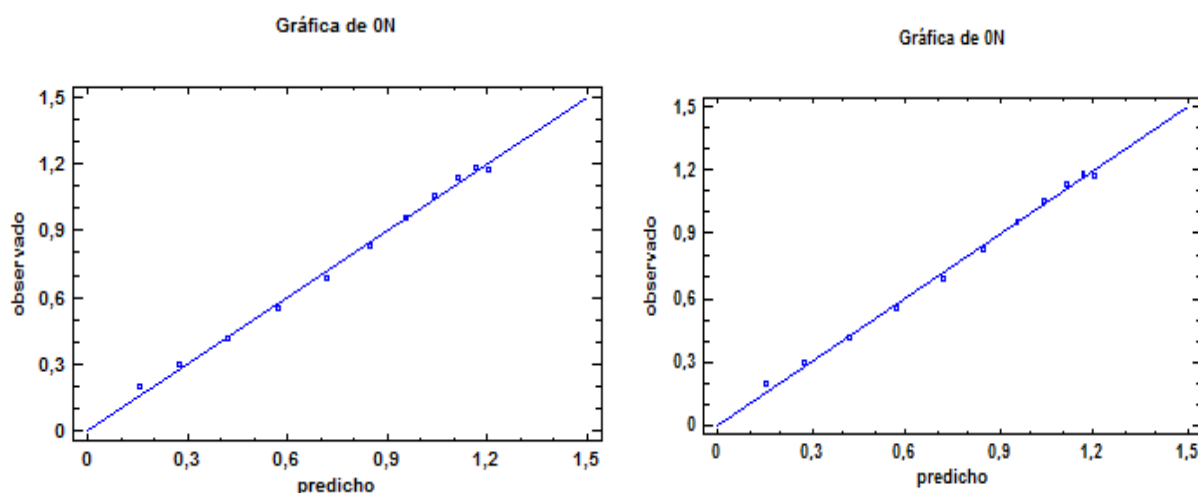


Figura 2: Gráficos para dosis 0 de N en seca y edades en días y semanas respectivamente.

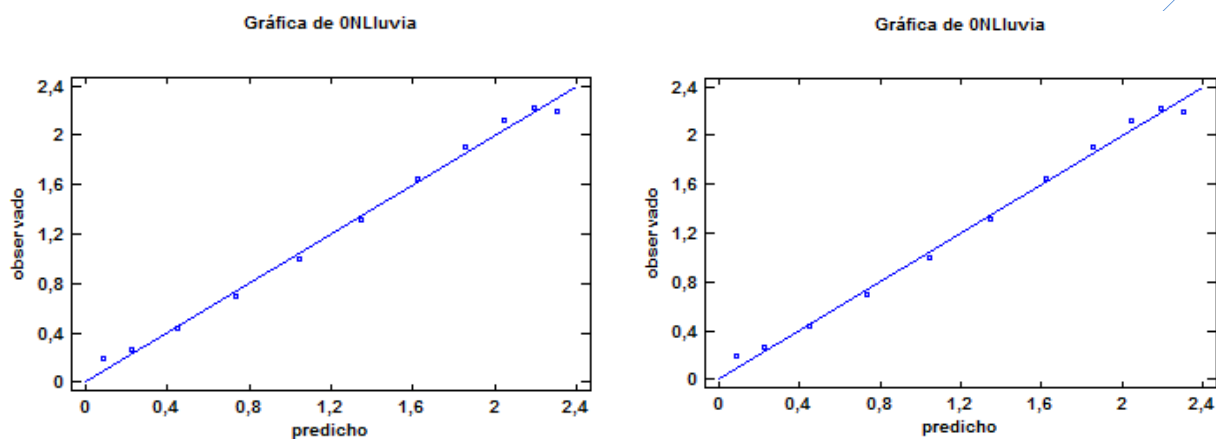


Figura 3: Gráficos para dosis 0 de N en lluvia y edades en días y semanas respectivamente.

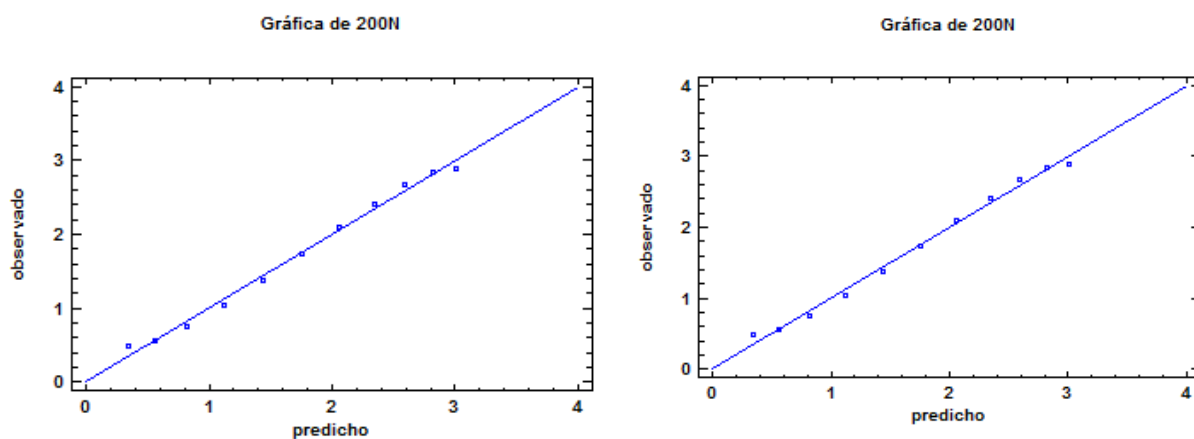


Figura 4: Gráficos para dosis 200 de N en lluvia y edades en días y semanas respectivamente.

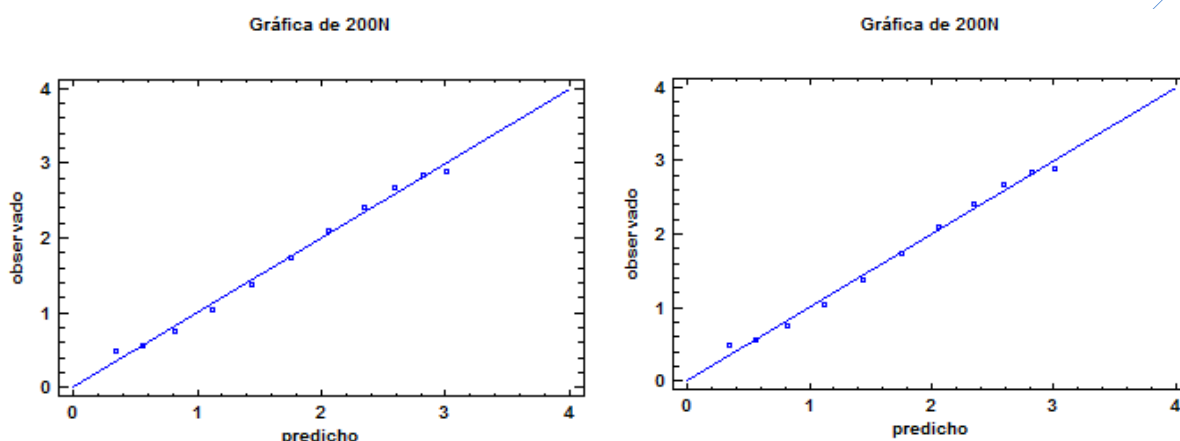


Figura 5: Gráficos para dosis 200 de N en seca y edades en días y semanas respectivamente.

Estas características confieren alta precisión a los modelos (Drapper y Smith, 2002) para representar el proceso de acumulación de biomasa del pasto estrella.

En cuanto a los parámetros en los dos períodos estacionales se observó que los valores de A y c fueron cercanos y sus errores estándares pequeño. Esto indicó menor amplitud de los intervalos de confianza de estos parámetros lo cual confiere mayor concentración de sus valores alrededor del verdadero valor del parámetro (Montgomery *et al.*, 2005).

Como se apreció, en los resultados encontrados, el modelo de Gompertz representó de forma adecuada el crecimiento del pasto estrella, resultado que coincide con los encontrados por Díaz (2007) y Rodríguez (2015) en variedades de la especie *P. purpureum* y Barker *et al.* (2010) en otras gramíneas de sendero fotosintético C4.

Según Black (1973) Las plantas tipo C4 presentan las siguientes características:

- Además del ciclo fotosintético con intermediarios de 3 carbonos disponen de otro alternativo con intermediarios de 4 carbonos.
- Viven en climas tropicales (maíz, sorgo, caña de azúcar, entre otras).

- No se saturan y aprovechan las altas intensidades luminosas.
- Son todas plantas vasculares.
- Transpiran poco (Soportan bien la escasez de agua).
- Sus células tienen dos tipos de cloroplasto.
- Son especialistas de zonas cálidas y húmedas.
- Gastan 5 ATP para fijar un O₂.

Estos últimos resaltaron la asimetría del modelo para representar el crecimiento de gramíneas tropicales perennes en un ciclo de 112 días o 12 semanas. Según estos autores las plantas C₄ presentan tasas de incremento antes (aceleración) y después del punto de inflexión (desaceleración) diferentes, lo cual guarda relación lógica con el proceso de acumulación de biomasa de gramíneas tropicales.

En la tabla 4 se muestra la edad a la que se alcanzó el punto de inflexión, el punto óptimo para cortar el forraje y la fase L.V.C. o período de lenta velocidad de crecimiento, los cuales constituyen parámetros de interés para el desarrollo de estrategias en la investigación y la producción.

Tabla 4. Relación entre la edad y el rendimiento en el punto de inflexión, punto óptimo y fase de lenta velocidad de crecimiento para las diferentes dosis de N en el período poco lluvioso y lluvioso.

Poco lluvioso					
Dosis N (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Punto de Inflexión		Punto Optimo		L.V.C (días)
	Edad (días)	RMSA (tha ⁻¹)	Edad (días)	RMSA (tha ⁻¹)	
0	84	1,21	32,3	0,50	7,30
200	84	2,89	44,6	1,4	11,3

Lluvioso					
Dosis N (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Punto de Inflexión		PuntoOptimo		L.V.C (días)
	Edad (días)	RMSA (tha ⁻¹)	Edad (días)	RMSA (tha ⁻¹)	
0	84	2,38	37,5	0,96	17,5
200	84	5,66	30,3	2,2	10,3

RMSA: rendimiento de materia seca acumulada

En la tabla 5 se presentan los criterios estadísticos utilizados para los modelos multiplicativos en ambos períodos estacionales, dosis 200 de N t⁻¹ año⁻¹. Los modelos explicaron adecuadamente la variabilidad entre el RMSA y las edades de rebrote, con valores de 70, 75 % respectivamente, con alta significación estadística en los períodos lluvioso y poco lluvioso, respectivamente (Del Pozo y Herrera, 1995).

Tabla 5. Estadísticos de ajuste y estimaciones de los parámetros de los modelos del rendimiento de materia seca acumulada con la edad de rebrote de la planta y efectos ambientales.¹

									Radiación		Agua	
Período	N	R ² %	Sign. modelo	ES ±	A	d	f	g	h	i	j	k
Seca	200	0,80	***	0,93	6,31441E-10	13.6196	-2,8732	0,2008	-0,1888	0,0808	0,08260	0,00053
lluvia	200	0.71	***	0,71	0,5973	-0,2646	0,1727	0,015	-0,1888	0,0308	0,08280	0,00053

¹Modelos obtenidos por Del Pozo y Herrera 1995

Existen diversos criterios sobre el efecto del clima en el RMSA. Así Vanlauwe *et al.* (1997) encontraron que la pérdida de biomasa presentó mejor correlación con el número de días con lluvias que con cantidad total de lluvias caídas, aunque estos resultados se basaron en regímenes de lluvias aplicados artificialmente y no se tomó en consideración el efecto combinado de otras variables climáticas.

Por su parte, Herrera y Ramos (2006) informaron similar comportamiento del RMSA en Napier y kinggrass. Refirieron, además, que a medida que se incrementó la norma de riego, disminuyó la relación entre rendimiento y volumen total de agua (lluvia más riego). Esto pudiera estar determinado por la presencia de algún elemento limitante, como la temperatura o la radiación solar, que impide la eficiente utilización del agua en los diferentes procesos metabólicos que garantizan el crecimiento y desarrollo de la planta.

Los modelos de matemáticos, que incluyen más de una variable, representan mejor el fenómeno u objeto real que modelan (Thornley y France, 1984).

El modelo propuesto por Del Pozo y Herrera (1995) para estimar RMSA, envuelve tres variables, ello permite realizar simulaciones, bajo diferentes regímenes de desarrollo del cultivo (Goudriaan, 1985).

Por otra parte, las funciones matemáticas (Gompertz) representan el crecimiento del pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis*), bajo diferentes condiciones de manejo y dosis de N y realizan estimaciones sin incluir variables climáticas. Crespo (1981), señaló la influencia de estas variables sobre el RMSA, de ahí que el próximo capítulo, esté dedicado a la simulación del rendimiento de materia seca acumulada como función de la edad de rebrote y de algunas variables climatológicas.

CAPÍTULO 3. SIMULACION RENDIMIENTO DE MATERIA SECA ACUMULADA DEL PASTO ESTRELLA (*C.NLEMFUENSIS*), ALGORITMO DE CÁLCULO Y HERRAMIENTA COMPUTACIONAL

3.1 Introducción

Un modelo de simulación de cultivo según Campbell y Stockle (1994) es cualquier algoritmo que trata de describir de modo cuantitativo la respuesta del sistema de cultivo a su entorno. La idea inicial de los modelos de crecimiento de cultivos parte de la necesidad de integrar los conocimientos de suelo, clima, cultivos y prácticas agrícolas en una herramienta que facilite la toma de decisiones acertadas, a la hora de transferir tecnología agrícola desde una localidad a otras, con diferentes climas (IBSNAT, 1993). El enfoque de análisis de sistemas suministra un marco de trabajo en el que se lleva a cabo una investigación para entender el funcionamiento del sistema y de sus componentes (el sistema de cultivo en este caso, y sus componentes, el suelo + los factores meteorológicos + la especie y el cultivar + las prácticas de cultivo).

En este sentido, este capítulo tiene como objetivos simular el RMSA, con efectos climáticos y sin estos, así como brindar una herramienta computacional que facilite el trabajo de investigadores y directivos en la toma de decisiones antes los escenarios **A2** y **B2**.

3.2 Materiales y Métodos

Se utilizaron las ecuaciones de RMSA sin efectos ambientales obtenidas en el Capítulo 2 (Gompertz), el modelo multiplicativo obtenido por Del Pozo y Herrera (1995) dosis 200 y 400 kg de N.

Para los análisis de los contextos climáticos futuros, se usaron salidas diarias de los Modelos de Circulación General (MCG) Echan4 y se utilizó el forzamiento de los escenarios de emisiones (SRES, según sus siglas en inglés) **A2** y **B2** propuestos por el IPCC (2001) con una resolución espacial de 25 km. Esta selección de los escenarios, la ratifica Bárcena (2010) y Bárcena *et al* (2014), ya que consideran que las condiciones de América Latina y el Caribe seguirán determinadas por el desarrollo económico, con nuevas tecnologías

“limpias”, principalmente a nivel de regiones o localidades. Además, este modelo que se utiliza, se encuentra entre los disponibles y representa, en forma más adecuada, la circulación general de la atmósfera en el Caribe, según criterios de Jones *et al.* (2004) y Campbell *et al.* (2011).

Echan4 herramienta principal para hacer proyecciones sobre el cambio climático en el futuro, emplea modelos físicos complejos. Analiza la gama completa de escenarios, se complementa con modelos físicos simples, calibrados para ofrecer una respuesta equivalente a los complejos, en cuanto a la temperatura y al nivel del mar. Estas proyecciones se obtienen a partir de un modelo simple del clima cuya sensibilidad climática y consumo calorífico de los océanos estén calibrados con cada uno de los siete modelos climáticos complejos. La sensibilidad climática que presenta el modelo simple varía entre 1,7 y 4,2°C, similar a la variación comúnmente aceptada, que va de 1,5 a 4,5°C.

Para esta investigación, se tomó como referencia, los valores medios de precipitación y temperatura del período 1961 – 1990, y se consideraron los valores medios proyectados de dichas variables para los horizontes temporales 2011 – 2040, 2041 – 2070 y 2071 – 2099 para los escenarios seleccionados.

Según el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC son las siglas en inglés), los “escenarios” son descripciones coherentes y consistentes de cómo el sistema climático de la Tierra puede cambiar en el futuro. Estos son derivados de los escenarios de posibles emisiones futuras de GEI, los cuales se utilizan en modelos climáticos como elemento introducido para el cálculo de proyecciones climáticas. Cualquier descripción posible del clima futuro dependerá de cómo se asuman las emisiones futuras de los GEI y otros agentes contaminantes; es decir, dependerán de la opción del panorama de las emisiones.

Los escenarios del Reporte Especial de Escenarios de Emisiones (REEE) (IPCC, 2001) se utilizan como base de las proyecciones climáticas, de Modelo de Circulación General (MCG) y Modelos de Circulación General Acoplados de la Atmósfera y el Océano (MCGAO). Comprenden una línea evolutiva similar,

en lo que respecta a los supuestos demográficos, sociales, económicos y de cambios tecnológicos y se constituyen por cuatro familias de escenarios: **A2** y **B2** (IPCC 2000; IPCC, 2001) las cuales se explican en la tabla 6.

Tabla 6. Características de los escenarios de emisiones propuestos por el IPCC.

A2	B2
Propone una situación donde el mundo no sigue un patrón globalizante	
Se conservan las identidades locales y la población crece a un ritmo medio. El desarrollo económico y tecnológico es fragmentado y más lento que en otros escenarios. Se produce un aumento de la temperatura global del planeta en 2 °C	Priman las soluciones locales para problemáticas sociales, económicas y ambientales. Está orientado a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, pero siempre a nivel local o regional, Se produce un aumento de la temperatura global del planeta en 4 °C

Con esta información, se creó una base de datos. Como no existían datos sobre la radiación global, esta se estimó a partir de las fórmulas reportadas por la FAO (1997), ver Anexo 1. Se seleccionó la estación meteorológica de Güines situada en los 22 ° 53′ latitud norte y 82 ° longitud oeste provincia de Mayabeque por su cercanía a las áreas del Instituto de Ciencia Animal.

3.3 Herramientas y tecnologías de desarrollo utilizadas.

La selección de los entornos de trabajos que se utiliza en el desarrollo de sistemas, constituye un verdadero reto y un gran desafío para los analistas. Existen diferencias y por supuesto ventajas y desventajas entre las plataformas de desarrollo, motores de bases de datos y los lenguajes de programación existentes que los desarrolladores deben dominar para tomar una adecuada decisión en cada caso. Este proceso se debe realizar de forma tal que

satisfagan los requerimientos al menor costo posible, sin que signifique una pérdida de funcionalidad y eficiencia en el producto a lograr.

Lenguaje de Programación: Java.

Según Paz (2011) “Java es una tecnología orientada al desarrollo de software con el cual se puede realizar cualquier tipo de programa”. Es estable, portable, sencillo y menos complejos que otros lenguajes de alto nivel.

Dentro de las principales características se establece que constituye un lenguaje de programación orientado a objetos y de gran flexibilidad a la hora de integrarse con disímiles tecnologías. Es independiente de la plataforma, lo que garantiza ejecución de las aplicaciones en múltiples plataformas de hardware y sistemas operativos (Unix, Linux, OS/390, Windows entre otros) (Puerto, 2012).

Para llevar a cabo el desarrollo de una aplicación guiada por el lenguaje mencionado, es necesario contar con alguna herramienta que lo soporte y permita desarrollar, compilar, ejecutar y probarla. Se puede constatar en las investigaciones llevadas a cabo por Paz (2011), Puerto (2012) y Páez (2012) que el uso del lenguaje de programación Java lleva asociado la aplicación de un Entorno de Desarrollo Integrado (IDE).

Entorno de Desarrollo Integrado (IDE): Netbeans.

Un Entorno de Desarrollo Integrado o IDE (acrónimo en inglés de *integrated development environment*) constituye un ambiente de programación que consta de en un editor de código, un compilador, un depurador y un constructor de interfaz gráfica (GUI). En la actualidad existen múltiples IDE para el desarrollo de software entre los que se encuentran MyEclipse, Eclipse y NetBeans los cuales son utilizados para el desarrollo de aplicaciones java (Travieso, 2015).

El Netbeans es un IDE de código abierto escrito completamente en Java. Soporta el desarrollo de todos los tipos de aplicación Java (J2SE, web y aplicaciones móviles). También tiene soporte para varios lenguajes como PHP, Java script, HTML y CSS. Es un producto sin restricciones de uso (Rodríguez, 2015).

El autor de esta investigación, determinó utilizar el Netbeans en su versión 8.0, ya que simplifica tareas de desarrollo, además del sencillo manejo de los componentes visuales de los formularios de la aplicación, así como diseños de reportes.

Gestor de reportes: IReport

La gestión de reporte es el proceso que se utiliza para la toma de decisiones o bien para confeccionar informes detallados a los clientes, proveedores o bien sus propios empleados. Brindan la posibilidad de crear reportes según los parámetros que se especifican (Rodríguez, 2015a).

La herramienta iReport es un constructor y a su vez diseñador de informes visuales, poderoso, intuitivo y fácil de usar. Está escrito en Java y permite que los usuarios corrijan visualmente informes complejos con cartas, imágenes, sub-informes, entre otros. Brinda integración con JFreeChart, una de las bibliotecas gráficas Open Source más difundida para Java. Los datos para mostrar pueden ser recuperados de disímiles fuentes de datos (Travieso, 2015).

Sistema Gestor de Bases de Datos: SQLite.

García (2011) define los SGBD como “un conjunto de información almacenada en memoria auxiliar que permite acceso directo y un conjunto de programas que manipulan esos datos”. Un SGBD es una aplicación que permite a los usuarios definir, crear y mantener dicha base, proporcionando un acceso controlado a la misma.

3.4 Resultados y Discusión:

La figura 6 muestra la ventana principal de la aplicación desarrollada con cada uno de los principales elementos del menú.



Figura 6. Pantalla principal de la aplicación. SERPE

En la figura 7 se muestra la captura de datos, para estimar RMSA con efectos climáticos.

Figura 7. Captura información para estimar el RMSA con efecto ambiental

Como se puede observar, en la figura 8 se expone la captura de datos, para estimar RMSA sin efecto del clima.

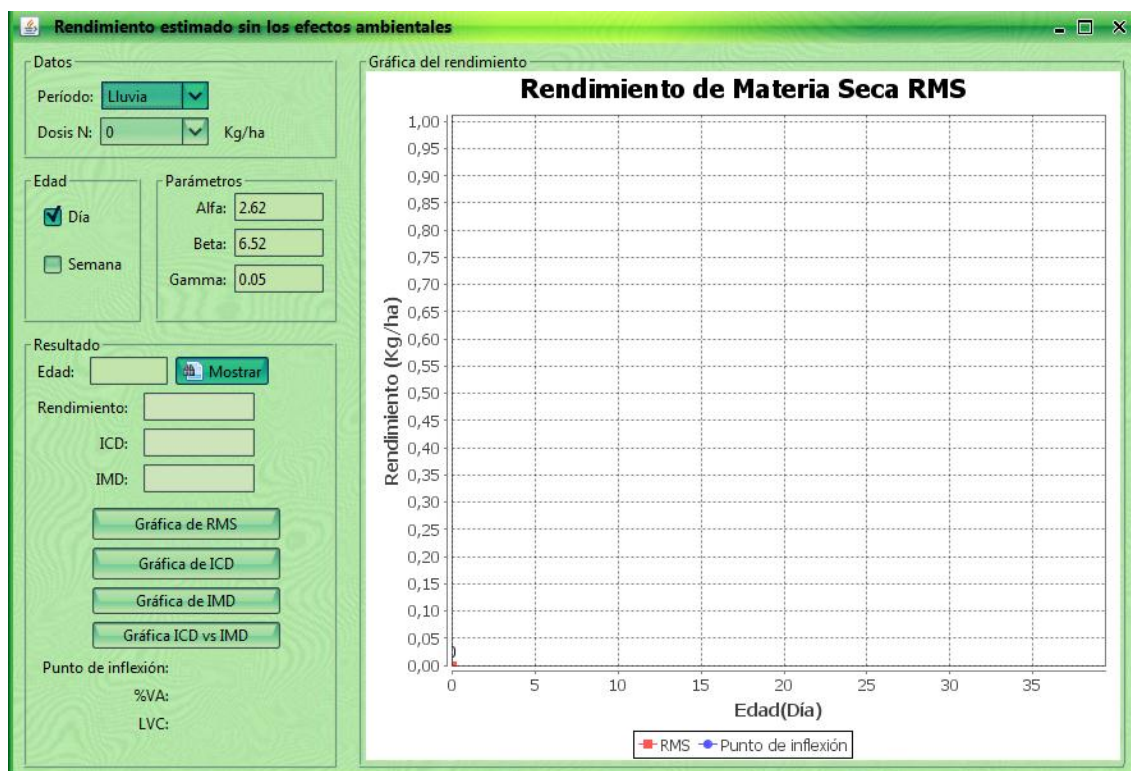


Figura 8. Captura información para estimar el RMSA sin efecto ambiental

La figura 9, muestra las curvas de incrementos corriente medio, diario y de crecimiento (Gompertz), para esta especie.

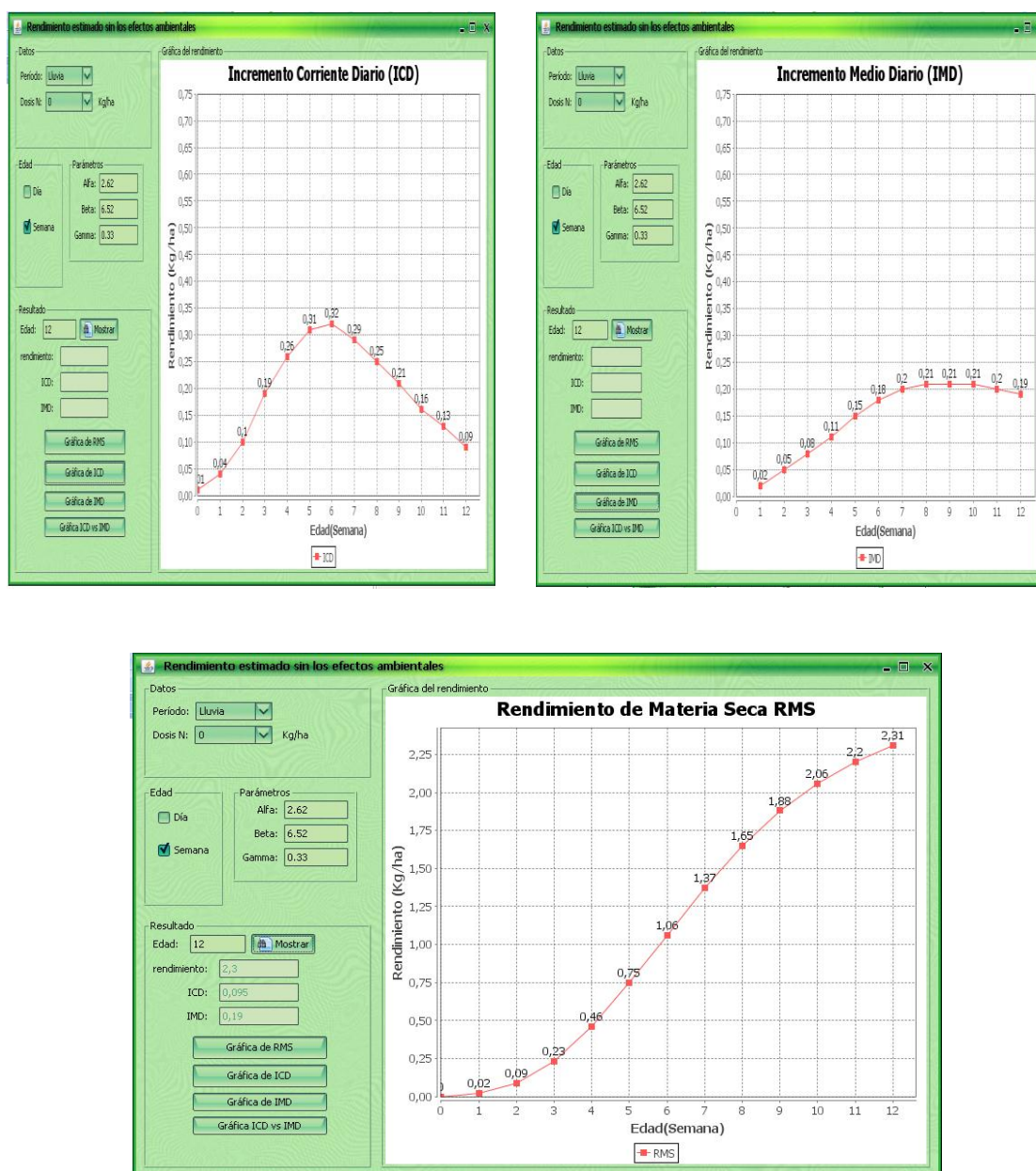


Figura 9. Curvas de incrementos medio, diario y de crecimiento para el pasto estrella.

En la figura 10 se aprecia la edad óptima en que debe ser cosechado el pasto estrella desde el punto de vista matemático.

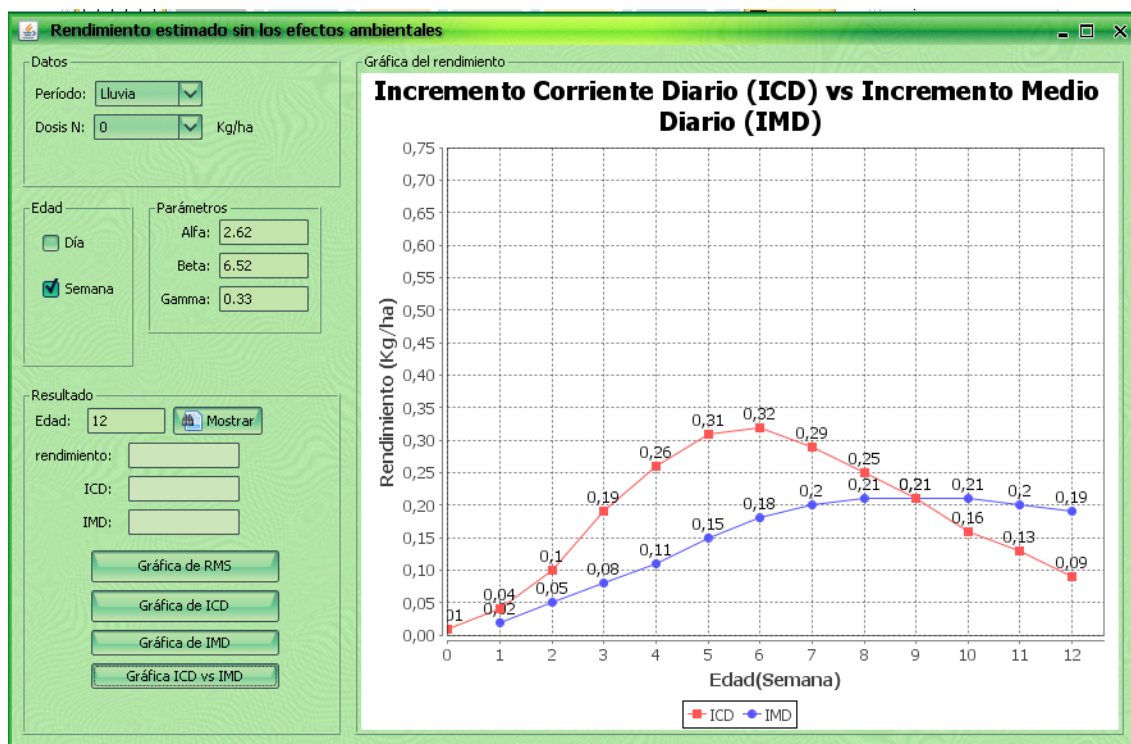


Figura 10. Edad óptima de cosecha del pasto estrella desde el punto de vista matemático.

En las tablas 6 y 7 se aprecian los rendimientos estacionales estimados para cada escenario (**A2** y **B2**) y horizontes temporales definidos. Como se observa, los RMSA en ambos escenarios disminuyeron, a medida que se incrementó la temperatura y disminuyeron radiación y precipitación, mucho más marcado en el período poco lluvioso.

Jasso (1989) planteó que un aumento de 2 °C de la temperatura global, significaría un incremento de esta misma cantidad de grados en la temperatura media global y una disminución de las precipitaciones en un 10 %, situaciones que tendrían un efecto negativo para el rendimiento de los cultivos (escenario **A2**).

Situación similar ocurre para el escenario **B2**, donde RMSA, disminuye en el período poco lluvioso, con la variación en las variables mencionadas.

Tabla 7. Escenario A2, dosis N=200, cortes cada 45 días

Período: poco lluvioso					
Intervalo ¹ Analizado	Temperat. Media °C	Precipitación media mm	Radia. Media MJ m ⁻² d ⁻¹	RMSA Corte ⁻¹ t ha ⁻¹	Cantidad. cortes
1961-1999	25,72	38,07	18,70	1,28	152
2011-2040	26,50	36,38	18,58	1,26	116
2041-2070	27,42	34,16	18,49	1,24	120
2071-2099	30,30	25,63	18,42	1,18	116
Período: lluvioso					
Intervalo Analizado	Temperat. Media °C	Precipitación media mm	Radia. Media MJ m ⁻² d ⁻¹	RMSA Corte ⁻¹ t ha ⁻¹	Cantidad. cortes
1961-1999	28,91	66,36	17,86	0,11	152
2011-2040	30,11	65,39	17,50	0,11	116
2041-2070	31,30	66,47	17,33	0,10	120
2071-2099	33,06	66,49	17,08	0,10	116

¹ horizontes temporales

Tabla 8. Escenario B2, dosis N=200, cortes cada 45 días

Período: poco lluvioso					
Intervalo Analizado	Temperat. Media °C	Precipitación media mm	Radia. Media MJ m ⁻² d ⁻¹	RMSA Corte ⁻¹ t ha ⁻¹	Cantidad. cortes
1961-1999	25,74	41,62	18,62	1,29	152
2011-2040	26,70	32,72	18,66	1,24	116
2041-2070	27,36	30,92	18,63	1,23	120
2071-2099	27,95	30,27	18,51	1,21	116
Período: lluvioso					
Intervalo Analizado	Temperat. Media °C	Precipitación media mm	Radia. Media MJ m ⁻² d ⁻¹	RMSA Corte ⁻¹ t ha ⁻¹	Cantidad. cortes
1961-1999	28,88	70,44	17,78	0,11	152
2011-2040	30,24	61,76	17,62	0,10	116
2041-2070	31,11	67,44	17,40	0,11	120
2071-2099	31,95	60,19	17,32	0,10	116

¹ horizontes temporales

El empleo de estos modelos permite profundizar en el estudio de diversas características del crecimiento del pasto estrella en relación con las condiciones climáticas.

En las figuras 11, 12 y 13, se aprecian otras bondades de la aplicación SERPE, que potencian su uso como herramienta de ayuda en la toma de decisiones ante los efectos del cambio climático.

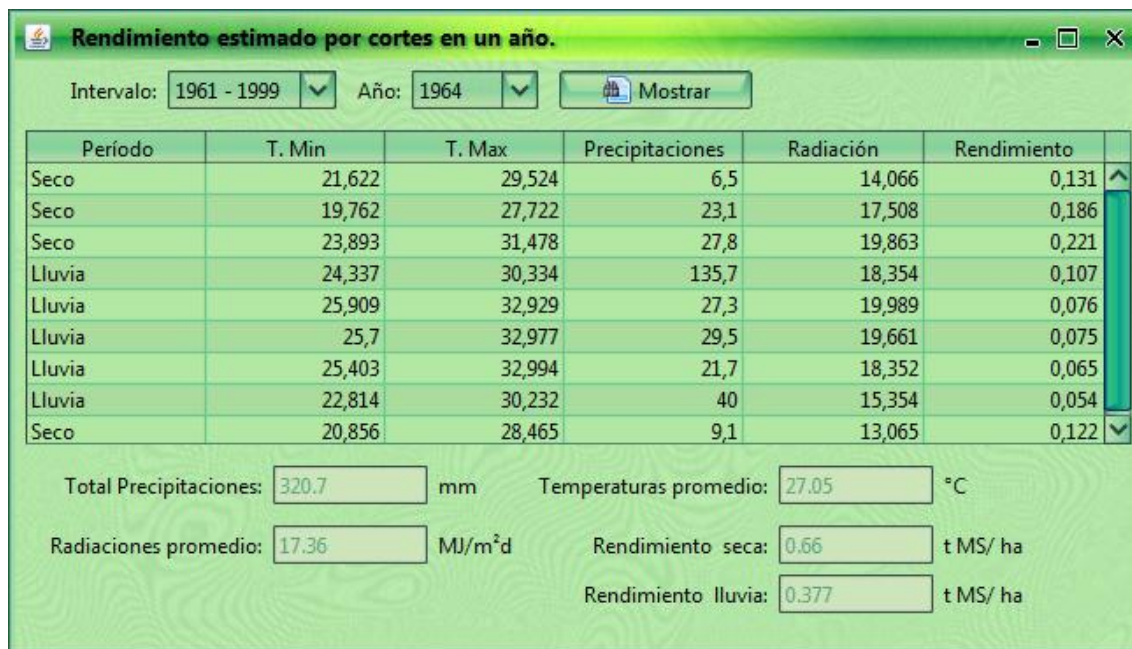


Figura 11. Rendimiento estimado por cortes en un año.

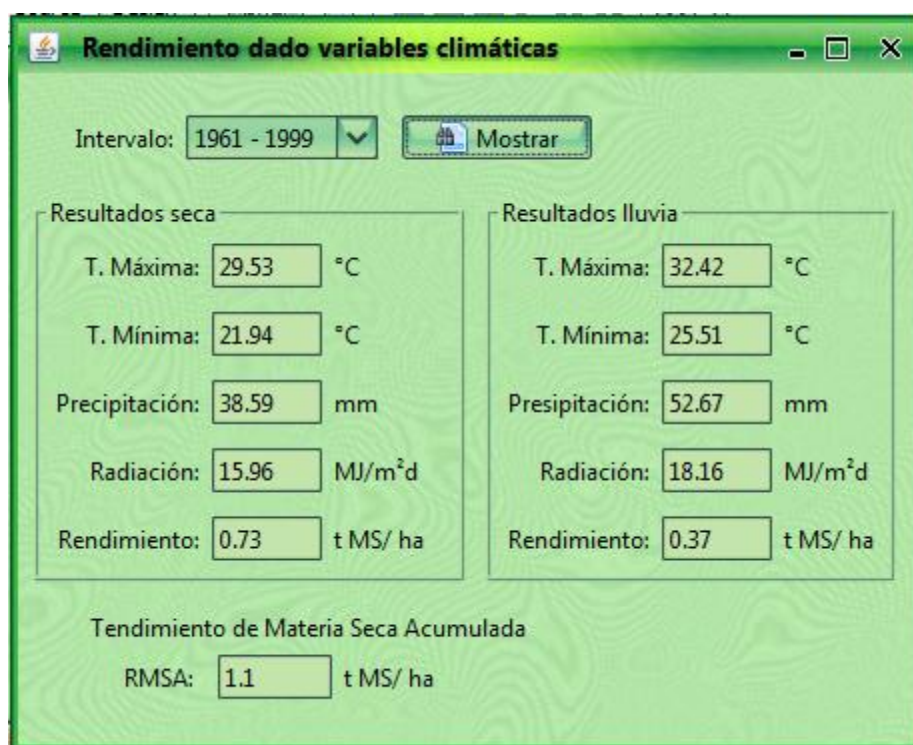


Figura 12. Rendimiento por variables climáticas.

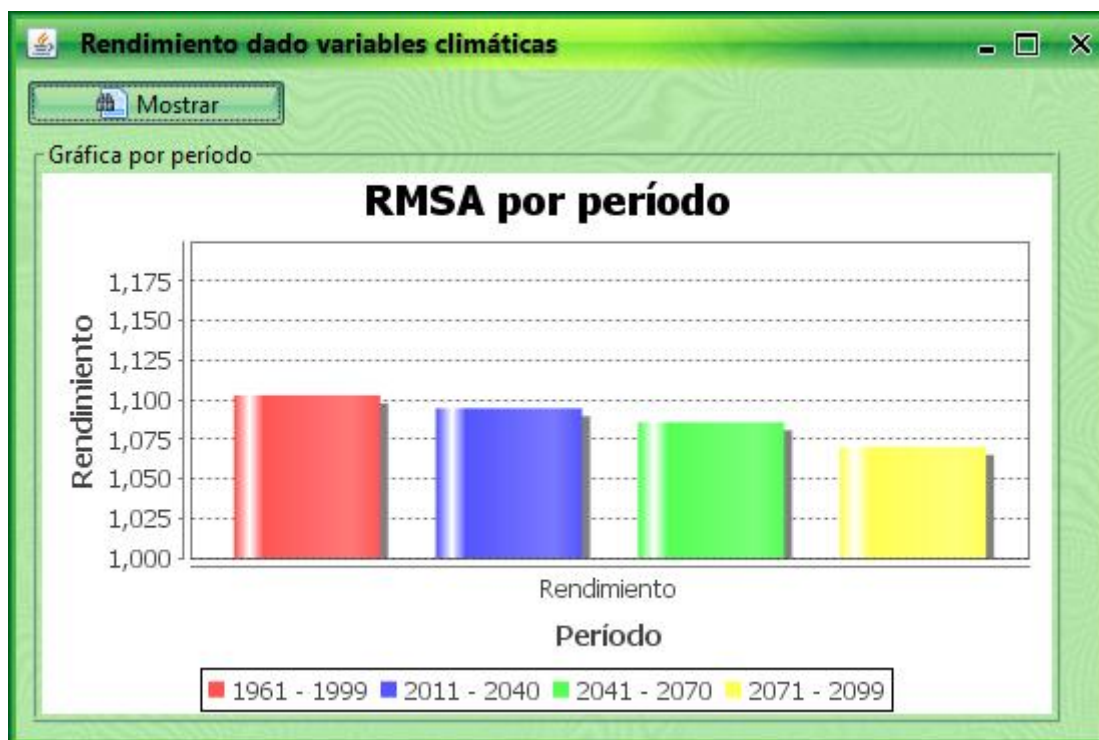


Figura 13. Gráfica del rendimiento por variables climáticas.

Por otra parte, la utilización por los productores de herramientas de ayuda en la toma de decisiones a través de la modelación y simulación, ha sido tradicionalmente baja (McCown, 2002). En el caso de los modelos de crecimiento de pastos, Wight y Hanson (1993) identificaron tres elementos fundamentales de la no utilización de estos modelos: en primer lugar, la escasa disponibilidad de datos de clima, la cual es resuelta en este modelo con la utilización de la base de datos meteorológica.

En segundo lugar la escasa disponibilidad de los datos de suelos y en tercer lugar el número de variables de estado que están presentes en otras aplicaciones y deben ser inicializadas.

Otro aspecto que conspira en la utilización de los modelos es la dificultad de interpretar y aplicar los resultados de estos, mencionada como otra posible explicación a la limitada utilización de los modelos como herramientas de ayuda en la toma de decisiones (Wight y Hanson, 1993).

Por otro lado, en función de la objetividad de los resultados, es recomendable configurar el sistema de forma que se ajuste a las especificidades de la unidad

que se evalúe, por ejemplo, que la información sobre la frecuencia de corte, las dosis de N y sobre todo la información climática, sean lo más precisa posible, para obtener razonables estimaciones de la producción de biomasa.

El software obtenido posee importantes características desde el punto de vista de la ingeniería de software, tales como consistencia, eficiencia, integridad, flexibilidad, portabilidad y seguridad entre otras, todas muy deseables en los programas de aplicación (Menner, 1995; Senn, 1998), su proceso de validación no puede ser considerado totalmente conclusivo.

Lo anterior se debe, fundamentalmente a las características propias de la temática que aborda el software, la concepción del diseño que fue empleada en correspondencia con los objetivos propuestos e incluso, a la no existencia en Cuba de ningún otro programa de aplicación a la estimación de la biomasa para el pasto estrella.

CONCLUSIONES

1. Se obtuvo una base de datos de variables climáticas que contiene dos escenarios meteorológicos diferentes para el planeta, la misma se incluyó en la herramienta computacional elaborada para simular el rendimiento de materia seca acumulada bajo diferentes condiciones ambientales.
2. El modelo Gompertz ajustó los datos para el pasto estrella (*C. nlemfuensis*) con elevados coeficientes de determinación que fluctuaron entre 99 % para los períodos poco lluvioso y lluvioso respectivamente.
3. El momento óptimo de utilización del forraje fue variable y se debe realizar en el punto donde se interceptan las curvas de Incrementos corriente diario y medio.
4. Las edades óptimas de cosecha para la dosis 0 kg de nitrógeno obtenidas desde el punto de vista matemático resultaron 32,3 y 37,5 días para los períodos poco lluvioso y lluvioso respectivamente. Mientras que, para 200 kg de nitrógeno, se obtuvieron 44,6 y 30,4 días para ambos períodos estacionales.
5. Se encontró que un incremento de la temperatura media del planeta en 2 y 4 °C. tendría efectos negativos en el rendimiento de materia seca acumulada de este cultivo fundamentalmente en el período poco lluvioso.

RECOMENDACIONES

1. Investigar nuevos modelos para representar el rendimiento de materia seca acumulada como función de la edad y las variables climáticas.
2. Modelar e incorporar al software las ecuaciones correspondientes a la dosis 0 de nitrógeno, con el uso del modelo multiplicativo.
3. Incorporar nuevas variedades de pastos y forrajes al programa computacional SERPE y evaluar el efecto del cambio climático en su rendimiento de materia seca acumulada.
4. Estudiar el efecto del cambio climático en los indicadores de calidad de los pastos y forrajes.

Referencias bibliográficas

- Abarca, S. 2013. Cambio climático y la mitigación en fincas lecheras. Revista UTN Informa. Costa Rica. (63). pp 28-31.
- Adams, N.G., Lesoing, M. y Trainer, V.L. 2000. Environmental conditions associated with domoic acid in razor clams on the Washington coast. J. Shell. Res. 19: 1007-1015.
- Adams R. M., Hurd B. H., Lenhart S. y Leary N. 1998. Effects of global climate change on agriculture: an interpretative review. Climate Research 11(1):1 9–30.
- Aduriz-Bravo, A. 2012. A "Semantic" View of Scientific Models for Science. Science & Education, 1 – 19.
- Agudelo, D.A., Cerón, M.F. y Restrepo, L. F. 2008. Modelación de funciones de crecimiento aplicadas a la producción animal. Rev. Col. Cienc. Pec. 21: 39-582_misconceptions.pdf. [Consulta 25 de enero 2013].
- Agudelo, D.A., Cerón, M.F. y Restrepo, L. F. 2008. Modelación de funciones de crecimiento aplicadas a la producción animal. Rev. Col. Cienc. Pec. 21: 39-582_misconceptions.pdf. [Consulta 25 de enero 2013]
- Álvarez, A., Herrera, R.S., Noda, Aida C. y Díaz, Laisurys. 2012. Comportamiento de las precipitaciones en el Instituto de Ciencia Animal en Cuba durante el período 1970-2009, como base para el manejo estratégico de los pastos. Rev. Cubana Cienc. Agríc. 46:301
- Anon, 1994: Situación actual de las investigaciones que se desarrollan en el Pastoreo Racional Voisin en el Instituto de Ciencia Animal (MIMEO) 30 p.
- Antignani, D., Ferriani A., Tadeu G., Puntel Milene, Teodoro, Ana Lucia., Garcia, Tatiana. 2014. Intake, digestibility of nutrients, milk production and composition in dairy cows fed on diets containing cashew nut shell liquid. Acta Sci. Anim. Sci. vol.36 no.3. Disponible en: <http://www.scielo.br> [Consultado: 29 de octubre 2014]
- Banco Mundial, (2015). Lima Perú 5 al 12 octubre 2015. Reunión Anual del BM y del FMI. <http://www.bancomundial.org/es/topic>
- Bárcena, Alicia 2010. Restricciones estructurales del desarrollo en América Latina y el Caribe: una reflexión postcrisis; Revista CEPAL 1 0 0, abril 2010. pg 7 – 28.

Referencias bibliográficas

- Bárcena, Alicia, Prado, A., Samaniego, J.L. y Pérez, R. 2014. La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe. Paradojas y desafíos del desarrollo sostenible. Cepal 98 pp.
- Barker, D.J., Ferraro, F.P., La Guardia, R., Mark, R., Lopes, F., & Albrecht, K.A. 2010. Analysis of Herbage Mass and Herbage Accumulation Rate Using Gompertz Equations. *Agronomy Journal*, Volume 102, Issue 3. Disponible en: <http://es.slideshare.net/> [Consultado: 4 de septiembre 2014].
- Bingham, N.H. & Frees, J. M. 2010. *Regression Linear Models in Statistics*. Imperial College. London. UK. 282 p.
- Black Jr CC. 1973. Photosynthetic carbon fixation in relation to net CO₂ uptake. *Annual Review of Plant Physiology* 24, 253-286.
- Boote, K.J., Jones, J.W. & Pickering, N.B. 1996. Potential uses and limitations of crop models. *Agr. J.* 98:704-716.
- Burguillo, F. J. 2005. Ajuste de ecuaciones a curvas: introducción a la regresión lineal y no lineal. Disponible en: <http://web.usal.es/> [Consultado: 19 de marzo de 2012].
- Cabrera, E.J., Sosa, E.E., Castellanos, A.F., Gutiérrez, A.O. & Ramírez, J.H. 2009. Comparación de la concentración mineral en forrajes y suelos de zonas ganaderas del estado de Quintana Roo. México. *Vet. Méx.* 40: 167.
- Cailliez, F. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos. Vol. 1 (22):1.
- Calzada, J.M., Enríquez, J. F., Hernández, A., Ortega, E., Mendoza, S. I. 2014. Growth analysis of maralfalfa grass (*Pennisetum* sp.) in a warm humid climacteric. *Mex. Cienc. Pecu.*, 5(2):247-260.
- CAMPBELL, G. S.; STOCKLE, C. O., 1994. Principles and applications of cropping systems simulation modeling. Manual del Curso de Postgrado. Universidad de Lleida. Lleida (España).
- Campbell, Jayaka D., Taylor, M.A., Stephenson, Tannecia S., Watson, R.A. and Whyte Felicia S. 2011. Future climate of the Caribbean from a regional climate model. *Int. J. Climatol.* 31: 1866–1878 (2011).
- Candelaria, B., Rosado, O.R., López, G., Pérez, P., Martínez, A. y Vargas, L. 2011. Aplicación de modelos de simulación en el estudio y planificación de la

Referencias bibliográficas

- agricultura. Una revisión. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/>[Consultado: 17de septiembre de 2013].
- Casas, Gloria A, Rodríguez, D., Afanador, G. 2010. Propiedades matemáticas del modelo de Gompertz y su aplicación al crecimiento de los cerdos. Rev. Colomb. Cienc. Pecu. 23:349-358.
 - Chacín, F. 1998. Análisis de regresión y superficie de respuesta. Ed. Cásares. R. Segovia, A. Gaskin. D. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. 111p.
 - Clerck, Fabrice de. Aplicaciones ecológicas para la adaptación al cambio climático en paisajes ganaderos. Resúmenes. VI Congreso Latinoamericano de Agroforestería para la producción pecuaria sostenible. Multiplicación de los sistemas agroforestales y silvopastoriles para la adaptación y mitigación del cambio climático en territorios ganaderos. (Eds. M. Ibrahim y E. Murgueitio). CATIECIPAV. Turrialba, C. R. p. 6. 2010.
 - Cooper, J.P. 1970. Potencial production and energy conversion in temperate and tropical grasses. Herb. Abst. 40:1.
 - Crespo, G. 1981. Variación de la respuesta de pangola (*Digitaria decumbes*, Stent) y Guinea (*Panicum maximum*, Jacq) al fertilizante nitrogenado a través del año. Tesis Cand. a Dr. C. ISCAH, Habana Cuba.
 - Cuevas, R. J. 2014. Matemáticas para la toma de decisiones. Disponible en: <http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r76474.pdf> [Consultado: 3 de diciembre 2014].
 - Davison, A. C. 2008. Statistical models. Cambridge University Press.The Edinburgh Building. Cambridge CB2 8RU. UK.726 p.
 - Deinum y Dirven, J.G.P. 1976. Climate, nitrogen and grasses. 7 comparison of production and chemicals composition of *Brachiaria ruziziensis* and *Setaria sphacelata* grown at different temperatures.
 - Deinum, B. 1971. Climate, nitrogen and grass. 3. Some effects of light intensity on nitrogen metabolism Neth. J. agric. Sci. 19:194-88
 - Del Pozo, P. P. y Herrera, R. S. 1995. Modelado del crecimiento del pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis*). 1. modelo multiplicativo con control de la curva de crecimiento y los efectos ambientales. Rev. Pastos y Forrajes 18(2):171-177.

Referencias bibliográficas

- Del Pozo, P.P. 1998. Análisis del crecimiento del pasto estrella (*C. nlemfuensis*) bajo condiciones de corte y pastoreo. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Agrícolas. ISCAH-ICA, La Habana, Cuba. 105 p.
- Dey, D. K., Ghosh, S. & Mallick, B. K. 2011. Bayesian modelling in bioinformatics. Chapman & Hall/CRC. Boca Raton. 468 pp.
- Di Rienzo, J. A. 2011. Análisis de regresión. Disponible en: <http://sites.google.com/site/dirienzojulio> [Consultado: 6 de agosto 2012].
- Di Rienzo, J.A., Balzarini, M., Casanoves, F., González, L., Tablada, M., Guzmán, W. y Robledo, C.W. 2012. Software estadístico InfoStat. Estadística y Biometría. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.
- Díaz, Dalibia. 2007. Evaluación agronómica de nuevas variedades *Pennisetumpurpureum* en condiciones de sequía el Valle del Cauto. Tesis en opción al Título Académico de Master en Pastos y Forrajes. Universidad de matanzas "Camilo Cienfuegos, 84 p.
- Dijkstra, J., Kebreab, E., Bannink, A., Crompton, L. A., López, S., Abrahamse, P. A., Chilibroste, P., Mills, J. A. N. y France, J. 2008. Comparison of energy evaluation systems and a mechanistic model for milk production by dairy cattle offered fresh grass-based diets. *Animal Feed Science and Technology*. 143: 203-219.
- Domínguez, J., Rodríguez, F.A., Núñez, R., Ramírez, R., Ortega, J.A. and Ruiz, A. 2013. Adjustment of nonlinear models and estimation of growth parameters in tropicane cattle. *Agrociencia*, 47: 25-34
- Dos Santos, A. C., Mingoti, R., Duarte, R., e Feilet, L. 2011. Simulação do crescimento do capim Tanzania irrigado com base na unidade fototérmica, na adubação nitrogenada e na disponibilidade hídrica do período. *Acta Scientiarum. Agronomy*, Maringá, 33: 2, p. 215-222.
- Esquivel, J. & Lacorte, S. 2010. Sistemas silvopastoriles con especies maderables en la República Argentina. Resúmenes. VI Congreso Latinoamericano de Agroforestería para la producción pecuaria sostenible. Multiplicación de los sistemas agroforestales y silvopastoriles para la adaptación y mitigación del cambio climático en territorios ganaderos. (Eds. M. Ibrahim y E. Murgueitio). CATIE-CIPAV. Turrialba, C. R. p. 68.

Referencias bibliográficas

- FAO 56 (1997). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. ESTUDIO FAO RIEGO Y DRENAJE. ISSN 0254-5293.
- FAO. 1994. ECOCROP 1. The adaptability level of the FAO crop environmental requirements database. Versión 1.0. AGLS. FAO. Rome, Italy.
- Fernández, Lucía. 2004. Modelos Estadísticos-Matemáticos en el análisis de la curva de lactancia y factores que la afectan en el genotipo Siboney de Cuba. Tesis presentada en opción al grado de Doctor en Ciencias Veterinarias. Universidad Agraria de la Habana. La Habana. Cuba. 100p.
- Fortes, Dayleni. 2012. Comportamiento morfofisiológico de Pennisetum purpureum cv. Cuba CT-115 utilizado como banco de biomasa. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. 102 p.
- Freund, R. J., Wilson, W. J. y Sa, P. 2006. Regression analysis. Elsevier. San Diego. 481 p.
- Friedrich, T. 2014. Producción de alimentos de origen animal. Actualidad y perspectivas. Rev. Cuban. Cienc. Agríc. 48:5
- Funes, F. 1977. Introducción y evaluación inicial de gramíneas en Cuba. Tesis Cand. ISCAH, La Habana. Cuba.
- Gallardo, P.C. 2008. Mathematical models in the context of sciences. Disponible en: <http://tsg.icme11.org/document/get/838> [Consultado: 10 de mayo de 2012].
- Gálvez, G., Sigarrosa, A., López, Teresa y Fernández, Jany. 2010. Modelación de cultivos agrícolas. Algunos ejemplos. Cultivos Tropicales. Vol. 31(3):60.
- García, A. (2011). Sistema para integrar la operación de las Centrales Telefónicas de diferentes proveedores existentes en todo el país. Trabajo de Diploma. Mayabeque, Cuba, Universidad Agraria de La Habana. hh. 23-25.
- García, C.R., Martínez, R.O., Tuero, R., Cruz, Ana María., Romero, Aida., Estanquero, L., Noda, Aida. y Torres. Verena. 2009. Evaluación de Panicum maximum cv. Mombaza y modelación de indicadores agronómicos durante tres años en un suelo ferralítico rojo típico de la provincia La Habana. Rev. Cubana Cienc. Agríc. 43: 297.

Referencias bibliográficas

- Giraldo, L.M., Lizcano, L.J., Gijsman, A. J., Rivera, B., Franco, L.H. 1998. Adaptation of the DSSAT model for simulation of *Brachiaria decumbens* production. *Pasturas Tropicales* 20(2):12.
- GOUDRIAAN, J. 1986. A simple and fast numerical method for the computation of daily totals of crop photosynthesis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 38 (1986) 249-254 Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam-Printed in The Netherlands.
- Gregorczyk, A. 1991. The logistic function. Its application to the description and prognosis of plant growth. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, Vol. 60 No. 1-2 p. 67-76.
- Grenón, D. 2005. PF: Programa de simulación para la planificación forrajera disponible en: <http://www.fca.unl.edu.ar/agromatica/SoftAgrop.htm> [Consultado: 30 de enero de 2014].
- Guerra, Caridad W., Cabrera, A., Fernández, L. 2003. Criterios para la selección de modelos estadísticos en la investigación científica. *Rev. Cubana Cienc. Agríc.* 37:3.
- Gwayumba, W., Christensen, D. A., McKinnon, J. J. & Yu, P. 2002. Dry matter intake, digestibility and milk yield by Friesian cows fed two Napier grass varieties. *Asian Aust. J. Anim. Sci.* Vol 15, No. 4: 516-521.
- Hanson, J.D., Skiles, J.W. & Parton, W.J. 1988. A Multispecies Model for Rangeland Plant Communities. *Ecological Modelling*, 44, 89-123.
- Hernández, C., Martínez, J. y Calvete. H. 2011. Modelos para la simulación dinámica del crecimiento y desarrollo de pastos. *Pastos*. 41 (2): 127.
- Hernández, Naivy., Soto. F. y Caballero, A. 2009. Modelos de simulación de cultivos. Características y usos. *Cultivos Tropicales* 30:1. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/> [Consultado: 3 de agosto de 2012].
- Herrera, J., Paretas, J.J. y Corona. L. 1981. Estudio técnico económico de la aplicación del nitrógeno en Kinggrass (*P. purpureum* x *P. americanum*). *Rev. Cienc. TecnAgric. Pastos y Forrajes* Vol 4(1): 48-50.
- Herrera, R. S. y Ramos, N. 2006. Factores que influyen en la producción de biomasa y la calidad. En: *Pennisetum purpureum* para la ganadería tropical.

Referencias bibliográficas

- Eds.Herrera, R.S., Febles, G. y Crespo, G. Ed. Instituto de Ciencia Animal. La Habana.Cuba. p-79.
- Herrera, R.S. 2006. Crecimiento y desarrollo. En: Fisiología, producción de biomasa y sistema silvopastoriles en pastos tropicales. Abono orgánico y biogás. 1ra Ed. Herrera, R.S., Rodríguez, Idalmis D., Febles, G.J. Ed. EDICA, La Habana, Cuba, p. 53.
 - Herrera, R.S. 2009. Mejoramiento de Pennisetumpurpureum en Cuba. Rev. Cubana Cienc. Agríc. 43:345.
 - Herrera, R.S. y Martínez, R.O. 2006. Mejoramiento genético por vías no clásicas. En: Pennisetumpurpureum para la ganadería tropical. Eds. Herrera, R.S., Febles, G. y Crespo, G. Ed. Instituto de Ciencia Animal, La Habana, Cuba. 37p.
 - Herrera, R.S. y Ramos. N. 1990. Evaluación agronómica. En: kinggrass. Plantación, establecimiento y manejo en Cuba. 1ra Ed. Herrera. R.S. Ed. EDICA, La Habana, Cuba, p-111-170.
 - IBSNAT, INTERNATIONAL BENCHMARK SITES NETWORK FOR AGROTECHNOLOGY TRANSFER, 1993. The IBSNAT decade. Department of Agronomy and Soil Science, College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii. Honolulu, HI 96822 Hawai (EEUU).
 - IPCC 2001.Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, van der Linden PJ, Xiaosu D (Eds.). Cambridge University Press. Cambridge, RU. 944 pp.
 - IPCC 2015. Special Report on Emissions Scenarios. IPCC Working Group III (WGIII). 35 pp.
 - Jasso, I.R. 1989. Modelación agrometeorológica del rendimiento comercial de los cultivos I. Frutales CENID-RASPA. SeminariosTécnicosB (13) 282-309.
 - Jay, O. 2012. Metodología para la comparación de tratamientos en modelos de regresión no lineal aplicados a procesos biológicos. Tesis presentada en opción al título de Doctor en Ciencias Veterinarias, Instituto de Ciencia Animal, La Habana, Cuba. 100 p.

Referencias bibliográficas

- Jones R. G., Noger M., Hassell D. C., Hudson D., Wilson S., Jenkins G., and Mitchell, J., 2004: Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS. Met Office Hadley Center, Exeter, UK, 40 pp.
- Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W D., Hunt, L. A., Wilkens, P W., Singh, U., Gusman, A. J. & Ritchie, J. T. 2003. The DSSAT Cropping System Model. Eur. J. Agron. 18: 235.
- Karadavut, U. 2009. Non-linear models for growth curves of triticale plants under irrigation conditions. Turkish J. of Field Crops 14(2): 105-110.
- Kiviste, A. J., G., Álvarez, A., Rojo, A., Ruíz, D. 2002. Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Instituto de Investigaciones y Tecnología Agraria y Alimentaria. Madrid. 190 p.
- Krishna, V. R. 2005. Crop growth modeling and its applications in agricultural meteorology. Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology pp. 235-261.
- La O, M. A., Guevara, F., Fonseca, N., Rodríguez, L., Pinto, R., Gómez, H., Medina, F. J. y Hernández, A. 2013. Rev. Cub. Cienc. Agríc. 47:1.
- Lamela, L. et al. 2009. Efecto del sistema silvopastoril en el comportamiento productivo de vacas Holstein. Pastos y Forrajes. 32:175.
- Leahy, S. 2013. Recalentamiento planetario empeorará la brecha. Tierramérica. Lunes 1 de julio 2013. Disponible en <http://tierramerica.info/nota.php?lang=esp&idnews=4592>.
- Leary, N., Kulkarni, J. y Seipt, C. 2007. Assessment of impacts and adaptation to climate change, Final Report of the AIACC Project, UNEP, Washington.
- León-Velarde, C. y Barrera, V. 2003. Métodos biomatemáticos para el análisis de sistemas agropecuarios en el Ecuador. INIAP y CIP. Quito. Ecuador. 187p.
- Madden, L.V. 1980. Quantification of disease progression. Disponible en: <https://www.msu.edu/user/staatz/Staatz-Quantification.pdf> [Consultado: 4 de agosto de 2014].
- Malhado, C.H.M., A.A. Ramos, P.L.S. Carneiro, J.C. Souza, F.S. Wechsler, J.P. Eler, D.M.M.R. Azevêdo y J.R.B. Sereno, 2008. Modelos no lineales para describir el Crecimiento de bufalinos de la raza murreh, Brasil. Pp. 1-8.

Referencias bibliográficas

- Martínez, R. O., Tuero, R., Torres, Verena y Herrera. R. S. 2010. Modelos de acumulación de biomasa y calidad en las variedades de hierba elefante, Cuba CT-169, OM-22 y kinggrass durante la estación lluviosa en el occidente de Cuba. Rev. Cubana Cienc. Agríc. 44: 189.
- McCown, R.L. 2002. Changing systems for supporting farmers' decisions: problems, paradigms, and prospects. Agricultural Systems 74: 179–220.
- McKeon, G. M., Day, K. A., Howden, S. M., Mott, J. J., Orr, D. M., Scattini W. J. & Weston, E. J. 1990. Management for pastoral production in northern Australian savannas. J. Biogeog. 17:355.
- Menner, W.A. 1995. Introduction to modeling and simulation. Johns Hopkins APL Technical Digest. 16(1): 6-17.
- Menchaca, M. A. 1978. Modelo multiplicativo con efectos de curva de lactancia controlados para el análisis estadístico de experimentos con vacas lecheras. Tesis presentada en opción al grado de candidato a doctor en ciencias. Instituto de Ciencia Animal, La Habana, Cuba. 119 p.
- Montgomery, D. C., Peck, E. A. y Vining, G. G. 2005. Introducción al análisis de regresión lineal. Compañía Editorial Continental. México. 588 pp.
- Moore, A. D., Donnelly, J. R., & Freer, M. 1991. Grazplan: an Australian DSS for enterprises based on grazed pastures. Proceedings International Conference on Decision Support Systems for Resource Management. Texas A&M University, CollegeStation, Texas, USA, 18 p.
- Nobre, P., Misztal, R., Tsuruta, S. y Bertrand, J. k. 2003. Analysis of growth curves of cattle by multiple-trait and random regression models. J AnimSci; 81:918-926. Noth. J. Agric. Sci. 24:67.
- Noguera, R. R., Pereira, R. L. & Solarte, C. E: 2008. Comparison of non-lineal models to describe growth curves in guinea pigs (*CaviaPorcellus*) from birth to slaughter age. LivestockResearchfor Rural Development, 20:5 .
- Ortiz, J. 2000. Modelación y Simulación matemática del reciclaje de N, P y K en sistema de pastoreo vacuno en Cuba. Tesis en opción al título de doctor en ciencias agrícolas, UNAH, ICA y UNAG.
- P.C.C. 2011. Lineamientos de la política económica y social del Partido y la Revolución. Partido Comunista de Cuba, La Habana, 38 pp.

Referencias bibliográficas

- Páez, R. L. y Rodríguez, E. (2012). Sistema de extracción de términos en el dominio de la informática. Trabajo de Diploma. Mayabeque, Cuba, Universidad Agraria de La Habana. h. 29.
- Parton, W. J., Scurlock, J. M. O., Ojima, D. S., Gilmanov, T. G., Scholes, R. J., Schimel, D. S., Kirchner, T., Menaut, J. C., Seastedt, T., Garcia, E., Apinan, K., & Kinyamario, J. I. 1993. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide. *Global Biochem. Cycles* 7:785-809.
- Paz, Y. y Bárcenas, Y. (2011). Sistema de gestión semántica de información geográfica. Trabajo de Diploma. Mayabeque, Cuba, Universidad Agraria de La Habana. h. 24.
- PCCC 2015. Programa Cambio Climático. X CONVENCIÓN INTERNACIONAL SOBREMEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO publicado en:
<http://www.cubambiente.com/Programa%20de%20Cambio%20Clim%C3%A1tico.pdf> .
- Pérez, F. & Martínez, J.B. 1994. Introducción a la Fisiología Vegetal. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid. 217 p.
- Puerto, Y. y Mejías, A. (2012). Sistema de gestión de trámites de salidas al extranjero. Trabajo de Diploma. Mayabeque, Cuba, Universidad Agraria de La Habana. h. 8.
- Ramírez, J.L. 2010. Rendimiento y calidad de cinco gramíneas en el Valle del Cauto. Tesis presentada en opción al título de Doctor en Ciencias Veterinarias, Instituto de Ciencia Animal, La Habana, Cuba, 121p.
- Ramírez, J.L. 2010. Rendimiento y calidad de cinco gramíneas en el Valle del Cauto. Tesis presentada en opción al título de Doctor en Ciencias Veterinarias, Instituto de Ciencia Animal, La Habana, Cuba, 121p.
- Ramírez, J.L., Verdecia, D & Leonard, I. 2008. Rendimiento y caracterización química del Pennisetum Cuba CT 169 en un suelo pluvisol. REDVET. Revista electrónica de Veterinaria. IX: 1695.
- Ramírez, R.O. et al. 2011. Rebrote y estabilidad de la población de tallos en el pasto Panicum maximum cv. "Mombaza" cosechado en diferentes intervalos de corte. Rev. Fitotec. Méx. 34:213.

Referencias bibliográficas

- Ramos, N., Herrera, R. S. y Curbelo, F. 1979. Reseña descriptiva del kinggrass. Instituto de Ciencia Animal. Cuba. p.5.
- Ramos, N., Herrera, R.S., Schalitz, G. y Curbelo, F. 1995. Estudio del rendimiento y calidad de gramíneas templadas evaluadas en Cuba. Rev. cubana Cienc. agríc. 29:109.
- Ramos, N.E.1983. Contribución al estudio de especies y variedades del género Cynodon para la producción de forraje. Tesis presentada en opción al grado de candidato a doctor en ciencias agrícolas. Instituto Superior de Ciencias Agropecuarias de la Habana.196p.
- Ribeiro, A. 2005. Curvas de crescimento em Produção Animal. Rev. Bras. Zootec. 34:786-795.
- Rodríguez S. Lourdes 2015. Modelación y simulación de la producción de biomasa de Pennisetum Purpureum Schumvc. kinggrass y su aplicación en la alimentación animal. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Veterinarias. Instituto de Ciencia Animal. Mayabeque. Cuba.
- Rodríguez, J., Gutiérrez, E., Rodríguez, H. 2010. Dinámica de sistemas de pastoreo. Editorial Trillas. México. 272 p.
- Rodríguez, Lourdes. Larduet, R., Martínez, R.O., Torres, Verena., Herrera, Magaly., Medina, Yolaine. y Noda, Aida C. 2013. Modelación de la dinámica de acumulación de biomasa en Pennisetumpurpureum cv. kinggrass en el occidente de Cuba. Rev. Cubana Cienc. Agríc. 47:119.
- Rodríguez, Lourdes., Torres, Verena., Martínez, R.O., Jay, O., Noda, Aida C. y Herrera, Magaly. 2011. Modelos para estimar la dinámica de crecimiento de (Pennisetumpurpureum) vc. Cuba CT-169. Rev. Cubana Cienc. Agríc. 45:349.
- Rodríguez, Y. 2015a. Sistema informático para el análisis y gestión de la entrega y tenencia de tierra en el municipio de Madruga. Trabajo de Diploma. Mayabeque, Cuba, Universidad Agraria de La Habana. h. 39.
- Royce, F., Meira, S. y Guevara, E. 1998. Optimización de manejo de frijol soja y maíz utilizando modelos de simulación e información de las fases ENSO en Pergamino, Argentina. XI Seminario Científico del Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. Noviembre de 1998. San José de las Lajas, La Habana, Cuba.

Referencias bibliográficas

- Ruiz, A. 2013. Adjustment of nonlinear models and estimation of growth parameters in tropicane cattle. *Agrociencia*, 47: 25-34.
- Ruiz, T.E., Torres, Verena., Febles, G., Díaz, H., Sarduy, Lucía y González, J. 2012. Utilización de la modelación para estudiar el crecimiento de *Tithonia diversifolia* colecta 10. *Rev. Cubana. Cien.Agríc.*, 46: 237.
- Rykov, V.V., Balakrishnan, N. & Nikulin, M.S. 2010. *Mathematical and Statistical Models and Methods in Reliability*. Springer New York Dordrecht Heidelberg London. 455p.
- Santana, A.A., Pérez. A. y Figueredo, María Eugenia. 2010. Efectos del estado de madurez en el valor nutritivo y momento óptimo de corte del forraje napier (*Pennisetum purpureum* Schum.) en época lluviosa. *Rev. Mex. Cienc. Pecu.* 1(3): 277.
- Senn, J.A. 1998. *Analysis & Design of Information Systems*. McGraw-Hill Inc., USA. 988 p.
- Simón, L. et al. 2010. Evaluación de vacas de doble propósito de genotipos Holstein x Cebú en sistemas de pastoreo arborizado. I. Primíparas. *Pastos y Forrajes*. 33:1.
- Sinisterra, J.A. et al. 2010 Bancos forrajeros mixtos en contextos agroecológicos variados como estrategia de alimentación del ganado durante la sequía del Niño 2009-10. Resúmenes. VI Congreso Latinoamericano de Agroforestería para la producción pecuaria sostenible. Multiplicación de los sistemas agroforestales y silvopastoriles para la adaptación y mitigación del cambio climático en territorios ganaderos. (Eds. M. Ibrahim y E. Murgueitio). CATIE-CIPAV. Turrialba, C. R. p. 12. 2010.
- Sokolowski, J. A. 2010. *Modeling and simulation fundamentals: theoretical underpinnings and practical domains*. Edited by John A. Sokolowski, Catherine M. Banks. Printed in the United States of America. 437p.
- SOKOLOWSKI, R. 2010. *Introdução à fenomenologia*. 2. ed. São Paulo: Loyola.
- StatSoft. Inc. 2003. *STATISTICA (data analysis software system)*. version 6. www.statsoft.com.
- Stöckle, C.O., Donatelli M. y Nelson, R. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*, 18, 289-307.

Referencias bibliográficas

- Thornley, J. H. M. & Verberne, E. L. J. 1989. A model of nitrogen flows in grassland. *Plant, Cell and Environment* 12:863-886.
- Thornley, J. H. M. & Verberne, E. L. J. 1989. A model of nitrogen flows in grassland. *Plant, Cell and Environment* 12:863-886.
- Thornley, J. H. M., and J. France. 2007. *Mathematical Models in Agriculture, Quantitative Methods for Plant, Animal and Ecological Sciences*. Second edition. CAB International, London U. K. 435 p.
- Thornley, J.H.M. & France, J. 2007. *Mathematical Models in Agriculture. Quantitative Methods for the Plant. Animal and Ecological sciences*. 2nd ed. Cromwell Press. Trowbridge. 906 p.
- Thornley, J.H.M. y France, J. 1984. *Mathematical model in Agriculture: A quantitative approach to problems in agriculture and related sciences* Butterworth. London. 335 p.
- Thorp, K. R., Dejongeb, K.C., Kaleitac, A. L., Batchelord, W. D., Paze, J.O. 2008. Methodology for the use of DSSAT models for precision agriculture decision support. *Computers and electronics in agriculture* 64: 276-285.
- Timothy, C.E., Marthews, T.R., Vogt, Deborah R., Purves, D., Rees, M., Hector, A., & Turnbull, Lindsay A. 2012. How to fit nonlinear plant growth models and calculate growth rates: an update for ecologists. *Methods in Ecology and Evolution*, 3: 245-256.
- Torres, Verena y Ortiz, J. 2005. Aplicaciones de la modelación y simulación en la producción y alimentación de animales de granja. *Rev. Cubana Cien. Agríc.* 39:397.
- Torres, Verena., Lazo. J., Ruiz, T.E. y Noda. A. 1999. Empleo de la modelación matemática en el estudio del pasto C. nlemfuensis. *Rev. Cubana Cien. Agríc.* 33:363.
- Torres, Verena., Sampaio, I. y Fundora. O. 2009. Modelo estocástico del comportamiento productivo en las etapas crecimiento de búfalos de agua en Cuba. *Rev. Cubana Cienc. Agríc.* 43:113.
- Torres, Verena., Sampaio, I., Meyer, R., Noda, Aida., y Sarduy, Lucía. 2012. Criterios de bondad de ajuste en la selección de modelos no lineales en la descripción de comportamientos biológicos. *Rev. Cubana Cienc. Agríc.* 43:113.

Referencias bibliográficas

- Travieso, M. y Rodríguez, H. (2015). Sistema de información nacional para el control de la inspección estatal. Trabajo de Diploma. Mayabeque, Cuba, Universidad Agraria de La Habana. h. 18.
- Ursul, A. D., Rodríguez, S. M., Berguete, R. N., Abramova, T. y Tornés, J. M. 1981. la dialéctica y los métodos científicos generales en la investigación. Tomo I. Ed. Ciencias Sociales. La Habana. 498 p.
- Van de Ven, G. W. J. 1992. Grasmod, A grassland management model to calculate nitrogen losses from grassland. Report 158, CABO-DLO, Wageningen. 109 p.
- Vázquez, Y. 2012. Modelación Estadístico-Matemática con variables mixtas para el estudio de la sostenibilidad social en una empresa ganadera bovina. Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias veterinarias, Universidad Agraria de la Habana, San José de las Lajas, Cuba. 99 p.
- Vela, J.F. y Vargas, M. 2009. Caracterización de la dinámica de producción de materia seca del kikuyu (*Pennisetum clandestinum*) asociado con árboles y en pastoreo para producción de leche en el trópico alto colombiano. Winsor, C. P. 1932.
- Villanueva-Avalos, J.F. 2008. Effect of defoliation patterns and developmental morphology on forage productivity and carbohydrate reserves in WW-B.Dahl grass [*Bothriochloa bladhii*(Retz) S.T. Blake]. Tesis en opción al grado de Doctor en Agronomía. Texas Tech University, USA. 311 p.
- Washington coast. J. Shell. Res. 19: 1007-1015.
- Wight, R.J., Hanson, C., 1993. Making models easy to use. Proceedings of the XVII International Grassland Congress, 769–770
- Winsor, C. P. 1932. The Gompertz Curve as a Growth Curve. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A., 18(1): 1–8.

ANEXO 1

Estimación de la radiación solar

$$R_s = K_{rs} \sqrt{(T_{\max} - T_{\min})} R_a$$

donde:

R_a radiación extraterrestre [MJ m⁻² día⁻¹]

$T_{\max}$ temperatura máxima del aire [°C]

$T_{\min}$ temperatura mínima del aire [°C]

K_{rs} Coeficiente de ajuste (0,16...0,19) [°C^{-0,5}]

$$R_a = \frac{1440}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega)]$$

donde:

R_a radiación extraterrestre [MJ m⁻² día⁻¹]

G_{sc} constante solar = 0,082 MJ m⁻² min⁻¹

d_r distancia relativa inversa Tierra-Sol

ω_s ángulo de radiación a la puesta del sol [rad]

φ latitud [rad]

δ declinación solar [rad]

Grados decimales a radianes

$$[\text{radianes}] = \frac{\pi}{180} [\text{grados decimales}]$$

Distancia relativa inversa Tierra-Sol

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right)$$

Declinación solar

$$\delta = 0,409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39\right)$$

donde:

J es el número del día en el año entre 1 (1 de enero) y 365 (31 de diciembre)

Ángulo de radiación a la puesta del sol (ω_s)

$$\omega_s = \frac{\pi}{2} - \arctan \left[\frac{-\tan(\varphi)\tan(\delta)}{X^{0,5}} \right]$$

$$X = 1 - [\tan(\varphi)]^2 [\tan(\delta)]^2$$

y $X = 0,00001$ si $X \leq 0$