UNIVERSIDAD AGRARIA DE LA HABANA

"Fructuoso Rodríguez Pérez"

INSTITUTO NACIONAL DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

MAESTRÍA EN BIOMATEMÁTICA

Tesis en opción al título de Máster en Ciencias

Título: "Uso del Sistema de Apoyo para toma de Decisiones de Transferencia Agrotecnológica (DSSAT) para estimar la dosis óptima de fertilizante nitrogenado para la variedad de arroz J-104"

Autor: Ing. Osmel Rodríguez González

Tutores: Dr.C. René Florido Bacallao
Dr.C. Mario Varela Nualles

Mayabeque, 2019

Para llegar a la cumbre,
se debe avanzar paso a paso.

Shaw (2005)

Agradecimientos

- *A Dios; por darme fuerzas para poder llegar a esta meta.*
- *A mis padres; que me han apoyado en todo y son mi brazo derecho.*
- *A mi hijo Osmel David; que es mi motor impulsor y artífice de este logro.*
- *A mis tutores, Florido y Mario; que aceptaron guiarme en esta investigación a la cual han dedicado valiosísimo tiempo.*
- *A Deborah González; que me ayudó con los conocimientos sobre el arroz y cada vez que iba con una duda siempre me atendió.*
- *A los profesores de la Maestría en Biomatemática; que han contribuido a nuestra formación profesional y especialmente a Lucía que me dio la oportunidad de cursar esta maestría.*
- *A mis compañeros de maestría que hemos compartido experiencias todo este tiempo, especialmente a mis amigos Laura, Liansy, Yaimi y Asiel.*
- *A mis primos Natalí y Pedro; que siempre se han preocupado por mi superación y me brindaron su ayuda y consejo.*
- *A todos los que me han apoyado y me han dado ánimo para continuar.*

Muchas gracias

Dedicatoria

A mi hijo Osmel David;

a él todo mi amor y sacrificio

RESUMEN

El arroz (*Oryza sativa L.*), es uno de los cereales de mayor producción a nivel mundial. Cuba es uno de los países más altos consumidores de América Latina; con valores de alrededor de 72 kg per cápita por año. Hasta el momento, la producción nacional sólo satisface el 50 % de las necesidades. A pesar de la gran cantidad de recursos que se destinan a la producción del cultivo del arroz, los rendimientos que actualmente se obtienen no satisfacen la demanda existente ni se justifican económicamente. El presente trabajo se desarrolló con el objetivo de aplicar la herramienta de modelación DSSAT para estimar la dosis óptima de fertilizante nitrogenado en función del rendimiento esperado de la variedad de arroz J-104. Para calibrar el modelo se evaluaron tres experimentos, en la Unidad Científico Tecnológica de Base Los Palacios, perteneciente al Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, en diferentes fechas de siembra. Para la simulación se realizaron las corridas del modelo para diferentes dosis de nitrógeno, variando las mismas desde 150 hasta 200 kg ha^{-1}, con un intervalo de 10 kg ha^{-1} y se mantuvieron constantes los demás parámetros del modelo. Los resultados muestran que el modelo es capaz de describir adecuadamente la dependencia de los rendimientos con el nivel de nitrógeno aplicado y la dosis recomendada para obtener los mejores rendimientos.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN 1
CAPÍTULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA 6
1.1. El cultivo del arroz 6
1.1.1. El arroz en Cuba 7
1.1.2. Influencia de la fertilización nitrogenada en el cultivo del arroz 9
1.2. Modelos de simulación de cultivos 10
1.2.1. Modelo DSSAT 16
1.2.2 Coeficientes genéticos 19
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS 21
2.1. Calibración 21
2.2. Simulación 31
2.3. Análisis económico 32
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 34
3.1. Calibración 34
3.2. Simulación 43
3.3. Análisis económico 44
CONCLUSIONES 46
RECOMENDACIONES 47
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS
ANEXOS

INTRODUCCIÓN

El arroz (*Oryza sativa L.*), es uno de los cereales de mayor producción a nivel mundial y conjuntamente con el trigo, la carne y el pescado, constituyen la base de la alimentación humana. El 75 % de la población mundial lo incluye en su dieta alimenticia diaria y puede superar, en algunos casos, el consumo de otros cereales (Méndez, 2018; Maqueira *et al*., 2018).

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) informó que la producción mundial de este cereal en el año 2017 superó un 0,6 % la campaña del año anterior al alcanzar 503,9 millones de toneladas. Igualmente se prevé que la utilización mundial de arroz aumente en 1,1 %. El consumo humano debería representar la totalidad de este aumento, y permitir un incremento del consumo mundial per cápita a 53,7 kg (FAO, 2018).

Para mantener la seguridad alimentaria global, con el desafío añadido del cambio climático, en la actualidad hay una creciente necesidad de explotar la variabilidad genética existente y desarrollar variedades con un potencial de rendimiento genético superior y adaptación al estrés (Reynolds *et al*., 2016).

La necesidad mundial de aumentar de manera sostenible la producción de arroz como una alternativa para contribuir a la seguridad alimentaria y cubrir las necesidades crecientes de los pueblos, ha propiciado que los productores busquen mayores rendimientos en las áreas productivas utilizando especies que se adapten a esas condiciones.

Cuba es uno de los países más altos consumidores de América Latina; con valores de alrededor de 72 kg per cápita por año. Hasta el momento, la producción nacional sólo satisface el 50 % de las necesidades y éstas se completan con importaciones (FAO, 2018; Polón *et al*., 2012; Cordero, 2013).

Nuestro país invierte cuantiosas sumas en la importación de este cereal para la alimentación humana con vistas a suplir las necesidades de una creciente población. Los costos son cada vez más altos y, a su vez, resultan difíciles de adquirir en el mercado internacional, por diversas causas económicas, políticas y sociales.

Es por ello que la producción alimentaria es tarea fundamental en la economía cubana, cada superficie sembrada del cultivo de arroz debe obtenerse con altos rendimientos para satisfacer las necesidades crecientes de la población con un uso eficiente y racional de los recursos.

A pesar de la gran cantidad de recursos que se destinan a la producción del cultivo del arroz, los rendimientos que actualmente se obtienen no satisfacen la demanda existente ni se justifican económicamente. En el país, los cultivares de arroz presentan un potencial de rendimiento que supera las 7,0 t ha^{-1} (Hernández *et al*., 2016). Sin embargo, a pesar de que en Cuba existen condiciones de clima y de suelo favorables para el crecimiento y desarrollo de este cereal, en el 2016 el rendimiento no superó las 3,7 t ha^{-1} (ONEI, 2017).

El nitrógeno es el factor más relevante en la fijación del rendimiento en arroz. Este elemento es responsable de procesos fisiológicos como morfogénesis, crecimiento foliar, fotosíntesis y senescencia (De Datta, 1981).

En la década de 1990, el cultivo del arroz estatal o especializado, se vio limitado por la falta de fertilizantes para la nutrición. A partir del año 1996, el Ministerio de la Agricultura, tomó la decisión de potenciar la producción no especializada del arroz, con el objetivo de utilizar bajas cantidades de insumos (López *et al*., 2010).

Hoy más que nunca, el aumento de la producción de alimentos depende de la utilización prudente del nitrógeno. Además, cuestiones como el cambio climático, la variabilidad del clima, el suelo y el secuestro de carbono a largo plazo, efectos en la

seguridad alimentaria y la sostenibilidad del medio ambiente, se han convertido en aspectos importantes.

Por otra parte, la agricultura de los países tropicales enfrenta cada vez más nuevos retos, debido a cambios en las políticas macroeconómicas, al crecimiento de la población, el bajo rendimiento y a los límites de sostenibilidad de los recursos naturales utilizados en la producción. Conocer adecuadamente la dinámica del nitrógeno en las diferentes etapas de desarrollo de la planta de arroz, para poder elaborar alternativas más económicas y de bajo impacto ambiental son aspectos de especial importancia y deben ser objeto prioritario de actualización profesional. Cada día resulta más crucial la necesidad de la información en la toma de decisiones y existe un vacío importante entre la información que se necesita y la que se genera tradicionalmente mediante la investigación disciplinaria. Para este propósito una herramienta como los modelos de simulación de cultivos es de gran utilidad.

Durante los últimos 10 años se han desarrollado modelos de simulación de base ecofisiológica para un número importante de sistemas de cultivos. Estos se distinguen de los demás modelos empíricos por su representación explícita de los procesos físicos y biológicos tales como la fotosíntesis, producción de materia seca, crecimiento del área foliar, desarrollo de la planta, ciclo de nutrientes y su balance energético (Jones *et al*., 2003).

Los modelos de simulación de cultivos han demostrado ser herramientas que permiten evaluar los recursos disponibles, evaluar un gran número de interacciones planta-ambiente-manejo y facilitar la toma de decisiones, cuantificando el riesgo productivo a partir de un análisis de probabilidad tomando series históricas de datos climáticos diarios y las características de los suelos. Estos modelos de simulación son útiles para el tipo de análisis de factibilidad de la producción agrícola y la predicción de rendimientos medios y potenciales, contemplando su variabilidad temporal y espacial, evaluando el riesgo productivo ante los cambios climáticos previstos (Hernández *et al*., 2009).

El uso exitoso del modelo de cultivo depende de la calibración adecuada de los modelos. La determinación de los coeficientes genéticos de un cultivar se puede obtener a partir de la calibración apropiada del modelo (Choudhury *et al*., 2018). Los modelos de cultivos calibrados con parámetros de cultivar pueden utilizarse para analizar e interpretar distintos escenarios futuros debido a modificaciones que deseen proponerse en el manejo del cultivo, cambios en las condiciones climáticas o para el pronóstico de rendimiento, entre otros indicadores (Rodríguez *et al*., 2018).

DSSAT es un modelo popular de cultivo utilizado en más de 100 países durante más de 20 años (Jones y Thornton, 2003). Es un paquete de software para microcomputadoras, que proporciona una interfaz de modelos de simulación de cultivos-suelo, datos para el suelo y el clima, y programas para evaluar estrategias de manejo. Los coeficientes genéticos de las variedades de arroz populares de Cuba no se incluyen en la base de datos de cultivares de DSSAT

Teniendo en cuenta lo anterior, se plantea como problema científico: ¿Cómo garantizar un uso eficiente del nitrógeno para incrementar el rendimiento de la variedad de arroz J-104?

Hipótesis

La estimación de dosis óptimas de fertilización nitrogenada mediante el modelo DSSAT para la variedad de arroz J-104, permite incrementar los rendimientos y la rentabilidad del cultivo.

Basado en la hipótesis de trabajo, se propone como **Objetivo general:**

Aplicar la herramienta de modelación DSSAT para estimar la dosis óptima de fertilizante nitrogenado en función del rendimiento esperado de la variedad de arroz J-104.

Se proponen como **Objetivos específicos:**

1. Determinar los valores de los coeficientes genéticos que describen el comportamiento de la variedad de arroz J-104 en las condiciones de Cuba.
2. Simular el comportamiento del rendimiento de la variedad de arroz J-104 bajo el efecto de diferentes niveles de fertilización nitrogenada.
3. Realizar evaluación económica de la propuesta.

CAPÍTULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. El cultivo del arroz

Según Angladette (1969), es difícil establecer con exactitud la época en que se inició el cultivo del arroz (*Oryza sativa* L.). La literatura china lo ubica 3 000 años antes de Cristo (a. C), cuando se consideraba su siembra como una ceremonia religiosa importante reservada al emperador. Estudios arqueológicos mostraron que *Oryza sativa* se originó hace mucho tiempo. Las excavaciones en Hasthinapura revelaron que el arroz ya existía 1 000 años a. C. en el norte de la India. Este cereal se descubrió en las ruinas de Yangshao, China, supuestamente 2 600 años a. C. y se estima que tiene entre 6 000 y 7 000 años de antigüedad, a partir de su descubrimiento en Hemudú, China Central (Matsuo y Hoshikawa, 1993). En cualquier caso, lo cierto es que no existe un panorama claro al respecto.

El arroz es una planta monocotiledónea ubicada dentro del grupo Fanerógama, tipo Espermatofita, subtipo Angiosperma, clase Monocotiledónea, orden Glumiflora, familia Poaceae, subfamilia Panicoideas, tribu *Oryzae*, subtribu *Oryzineas* y género *Oryza* (Angladette, 1969; Tivy, 2014).

En la actualidad, el género *Oryza* abarca alrededor de 25 especies diseminadas en las regiones tropicales y subtropicales de Asia, África, Australia, América Central y del Sur, solo se reconocen dos especies cultivadas: s*ativa*, de origen asiático, y *glaberrima* de origen africano (Akinbile y Sangodoyin, 2010). En el caso específico de esta planta, los procesos naturales de evolución han causado una alta variabilidad genética, demostrada por el gran número de cultivares que hoy existen. Está considerada como el cultivo más versátil, pues los 120 000 cultivares conocidos se adaptan a diferentes climas, suelos y condiciones hídricas (Zuo y Li, 2014) y se considera una especie modelo para estudios de monocotiledóneas (Feng *et al*., 2002).

El arroz proporciona más calorías que cualquiera de los otros cereales cultivados (Acevedo *et al*., 2006; Puldón *et al*., 2011a). Tiene un aporte básicamente calórico a la dieta y, en el grano, el almidón se encuentra en mayor proporción con 88 a 90 % de

su masa seca. Además, su contenido de proteínas no debe menospreciarse, pues resulta el segundo componente químico, cuyo valor oscila entre 7,5 y 9,0 %; aunque en los últimos años se ha logrado incrementar notablemente el valor nutritivo en el cereal, fundamentalmente en su contenido de proteínas y hierro (Won *et al*., 2002; Puldón *et al*., 2011b).

A partir del año 2007 comenzó una crisis de alimentos, la cual se ha materializado en un aumento de los precios internacionales para todos los cereales y las oleaginosas. Los gobiernos están analizando con preocupación esta nueva tendencia, debido a que los incrementos en los precios de los alimentos agudizan los problemas de acceso y distribución a escala regional e internacional y, por tanto, influyen negativamente en los índices de pobreza y desarrollo. En este mismo año, la producción mundial alcanzó el nivel récord de 643 millones de toneladas, resultado que permitió apenas atender el consumo sin poder reconstruir las existencias mundiales, las cuales se encuentran en los niveles más bajos de los últimos 30 años (González y Linares, 2008).

Estos bajos resultados en los rendimientos del cereal tienen su origen en factores climáticos, como sequías prolongadas o lluvias atrasadas en ciertas regiones (Kato *et al*., 2007; Sarvestani *et al*., 2008), condiciones poco favorables que pueden mantenerse. Los rendimientos han progresado poco, 1 % al año; es decir, dos veces menos que durante la década de los 90 y tres veces menos que en los años 80; mientras que el consumo mundial, por su parte, continúa aumentando a un ritmo ligeramente superior (FAO, 2018).

1.1.1. El arroz en Cuba

El cultivo se estableció en Cuba alrededor del año 1750 (Deus, 1995); sin embargo, no fue hasta 1950, aproximadamente, cuando se introdujeron en el país algunos cultivares norteamericanos, como Blue Bonnet 50 y Century Padna 23.

Estos, por ser de porte alto, mostraron susceptibilidad al acamado y poca resistencia a enfermedades; fueron sustituidos por cultivares de tipo índica mejorados,

procedentes del Instituto Internacional de Investigaciones del Arroz (IRRI) en Filipinas, y del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) de Colombia (Morejón *et al*., 2005).

En Cuba, el cultivo se ha extendido a casi todas las regiones del país y cobra cada día mayor importancia. En la década de los ochenta, el aporte alimentario de este cereal representó el 13 % de las proteínas y el 15 % de la energía en la dieta de los cubanos y, posterior al año 2000, el 18 % y el 20 %, respectivamente (Suárez *et al*., 2002; Cristo *et al*., 2006).

Como parte del Grupo Empresarial Agrícola, y a partir de la existencia de un Programa de Desarrollo Integral del Arroz, se creó la División Tecnológica de Arroz con la misión de ejercer la dirección y el control operativo de los procesos productivos, así como la logística de la cadena productiva. Además, para evaluar los resultados de las entidades que se vinculan a la producción de arroz, desarrollar las inversiones agrícolas e industriales y, en coordinación con el Instituto de Investigaciones de Granos, extender el desarrollo científico técnico a las áreas productivas.

Esta entidad tiene subordinada las 12 empresas agroindustriales de granos que se encargan de producir el arroz y que conforman el sector especializado (empresas estatales). Estas empresas, en 2016 produjeron 112369 t de arroz cáscara en 25448 ha de suelo (ONEI, 2017). Adicionalmente, se vinculan a este cultivo 23000 productores, que se agrupan en 666 unidades productoras y conforman el sector no estatal. Este sector fue capaz de producir, en la misma campaña, 401676 t en 114568 ha (ONEI, 2017).

Para el año 2018, la producción de arroz consumo planificada fue de 283 mil toneladas y la entrega al encargo estatal de 224 mil toneladas; los rendimientos agrícolas superaron las 4,2 t ha^{-1}, cumpliendo lo aprobado en el Programa de Desarrollo Integral del Arroz. El incremento productivo se ha visto respaldado por un proceso inversionista

en la agricultura, la industria, el transporte y demás actividades que conforman el programa.

Para lograr el incremento en los rendimientos es necesario, entre otros aspectos, realizar una correcta fertilización nitrogenada del cultivo.

1.1.2. Influencia de la fertilización nitrogenada en el cultivo del arroz

Según Lavecchia (1991), para el arroz no existe una dosis de nitrógeno a recomendar, debido a la gran cantidad de factores que intervienen en la relación nitrógeno aplicado/respuesta del cultivo; la utilización de un manejo adecuado del fertilizante nitrogenado, según la necesidad del cultivo, conduce a un mejor uso del mismo, a la disminución de las pérdidas y a un aumento de la asimilación del nutriente, con incrementos manifiestos en los rendimientos agrícolas.

Con la aplicación de una dosis adecuada de nitrógeno aumenta la intensidad del ahijamiento y, por tanto, el número de hijos por planta. Sin embargo, las panículas se forman en los primeros hijos que se producen, ya que los hijos tardíos solo conducen al alargamiento del ciclo de la planta (Rafey *et al*., 1989; Singh y Singh, 1990; Morooka *et al*., 1993). El fraccionamiento de los fertilizantes resulta una práctica necesaria para favorecer una mayor eficiencia en la nutrición. El fraccionamiento depende de las variedades, rendimiento, suelo y época de siembra.

La planta de arroz demanda nitrógeno desde que se nutre del suelo hasta el inicio de la fase de maduración; la mayor demanda coincide con el punto de algodón. Por eso, el primer fraccionamiento se realizará temprano, en la etapa de cuarta a quinta hoja, para favorecer el crecimiento de la plántula y el desarrollo de los hijos productivos y también cuando se crean los fundamentos bioquímicos para la futura panícula (Saikia y Dutta, 1995). Este elemento influye positivamente en el volumen y superficie de absorción total y activa de las raíces y en el aumento de la clorofila en las hojas, contribuyendo a la intensificación de la fotosíntesis (Panda y Rao, 1991).

En el arroz se reportan dos picos de absorción de nitrógeno, uno en el estado de máximo ahijamiento y otro en el desarrollo de la panícula. Los últimos fraccionamientos se realizarán en la etapa de punto de algodón y 10 días después, para favorecer así el mayor número de granos llenos por panícula y el área foliar. Durante el estado de madurez se requieren altos contenidos de nitrógeno porque los carbohidratos que se acumulan en los granos son sintetizados durante esta etapa (Kambayashi *et al*., 1990).

Varios autores cubanos (Peña *et al*., 2001; Peña *et al.*, 2004a; Peña *et al.*, 2004b; Leyva *et al*., 2008) estudiaron el efecto de diferentes dosis de nitrógeno sobre el rendimiento de algunas de las variedades cubanas de arroz. Estos demostraron que el nivel de nitrógeno tiene un efecto altamente significativo sobre el rendimiento de las mismas.

Los esfuerzos científicos para cubrir la creciente demanda de alimentos en la población, evitando el continuo deterioro del ambiente, precisan de un método que reconozca lo complejo del mundo real. Esta complejidad surge tanto de consideraciones de naturaleza físico-químico-biológicas, como también de factores socioeconómicos, culturales y políticos. La herramienta que posibilita esta tarea son los modelos de simulación de cultivos.

1.2. Modelos de simulación de cultivos

Un modelo es la representación matemática de un sistema real con cierto grado de precisión y en la forma más completa posible, pero sin pretender aportar una réplica de lo que existe en la realidad (Wadsworth, 1997; Mukhtar *et al*., 2017). Los modelos son muy útiles para describir, explicar o comprender mejor la realidad, cuando es imposible trabajar directamente en ella. Son por excelencia la herramienta principal que utiliza la estadística para simbolizar problemas o situaciones de la vida.

La construcción de un modelo consiste en la individualización de una serie de ecuaciones matemáticas, mediante las cuales es posible reproducir el comportamiento del sistema examinado.

Un modelo de cultivo representa, de manera sencilla y sintética, los procesos fisiológicos y ecológicos del crecimiento y desarrollo de las plantas utilizando ecuaciones matemáticas (Gálvez *et al*., 2010).

Con la creciente capacidad de las computadoras y la inmensa investigación en el campo de la ciencia de la computación, se otorgan nuevas herramientas para apoyar el proceso de la toma de decisiones en diversas disciplinas y áreas de diseño y manejo de la industria. Los modelos de simulación de cultivos y el análisis del sistema suelo-planta-atmósfera son herramientas importantes para la investigación agrícola moderna (Murthy, 2011). Estos tienen varias aplicaciones actuales y potenciales en respuesta a temas relacionados con la investigación, el manejo de cultivos y la planificación. Estos constituyen un elemento importante para tomar decisiones en la agricultura al cuantificar, interpretar y predecir las necesidades hídricas de los cultivos, el desarrollo de estos y sus rendimientos; durante tres décadas esos modelos se han aplicado, fundamentalmente, en países de clima templado por los beneficios que aportan.

La aparición de los modelos de simulación ocurre a partir de la década del cincuenta con modelos descriptivos y matemáticos de los procesos involucrados; luego, a mediados de los sesenta aparece el concepto de sistemas dinámicos, que incluyen la variable tiempo y que representan el flujo de esos procesos y sus interacciones. En esta etapa se desarrollaron modelos como herramienta para explicaciones científicas, como por ejemplo, sintetizar y mejorar la comprensión de procesos tales como la intercepción de radiación y fotosíntesis. En la década del setenta se formaliza el concepto de dinámica de sistemas y en los ochenta se refinan, mediante técnicas de computación, la verificación, validación y evaluación de esos modelos.

La simulación de sistemas agrícolas empezó entonces a ser una herramienta para la integración de los diferentes componentes productivos dentro de los sistemas agrícolas. Los avances en el conocimiento de las interacciones dentro del ecosistema, influenciado por el ambiente y por las prácticas de manejo, expandió la potencialidad

de uso de esta herramienta como ayuda para la toma de decisiones (Barrett y Nearing, 1998). La aparición de la tecnología informática a mediados de los noventa permitió una mayor utilización de estos modelos para el estudio y resolución de problemas específicos, como son el desarrollo y crecimiento de los cultivos, la evaluación de respuesta a la fertilización, las estrategias de riego, las situaciones de estrés, la predicción de pérdidas por erosión, la lixiviación de pesticidas, la contaminación del ambiente, el calentamiento global de la atmósfera, entre otros (Guevara, 2007).

Los modelos de simulación constituyen un elemento importante para tomar decisiones en la agricultura al cuantificar, interpretar y predecir las necesidades hídricas de los cultivos, el desarrollo de estos y sus rendimientos. Estos pueden ayudar a la comprensión de interacciones genéticas-fisiológicas-ambientales con una integración interdisciplinaria. Permiten definir estrategias de producción en la etapa de la planificación de un cultivo futuro o ayudar a tomar decisiones tácticas durante el ciclo del cultivo, como son las prácticas culturales, la fertilización, el riego y el uso de plaguicidas (Meira y Guevara, 2000; Martín *et al*., 2014; Anwar *et al*., 2015; Asseng *et al*., 2015a; Asseng *et al*., 2015b; Mohanty *et al*., 2012). Modificando la escala de espacio y tiempo, los modelos permiten, además, abordar fenómenos climáticos analizando en forma interactiva el impacto de la variabilidad climática y las decisiones de manejo sobre la productividad de los cultivos; resultado difícil de obtener a partir de análisis estadísticos clásicos o experimentos agronómicos tradicionales.

Además, resultan un medio importante para aumentar la eficiencia de la investigación, ya que estos pueden auxiliar a los investigadores en la asimilación del conocimiento adquirido mediante la experimentación y proporcionan un marco de referencia para aportaciones de carácter multidisciplinario; asimismo, promueven el método de sistemas para la solución de problemas y facilitan una organización sistemática del conocimiento existente sobre cultivos y recursos naturales.

En general, son aceptables los puntos de vista de los que aseveran que el uso de los modelos de simulación para las ciencias agrícolas y biológicas y sus usos prácticos

está en un momento de gran importancia; se convierten en una poderosa herramienta para incrementar el entendimiento de la fisiología y ecología de los cultivos (Gálvez, 2008; Dong *et al*., 2014).

De acuerdo con la cantidad de datos y el conocimiento que está disponible dentro de un campo particular, se desarrollan modelos con diferentes niveles de complejidad. La clasificación de los modelos ha sido intentada anteriormente, pero no se pueden hacer delimitaciones definidas, ya que los modelos generalmente poseen características de más de un grupo (Gálvez, 2008). Los modelos de simulación se clasifican en dos grandes grupos: empíricos y mecanicistas.

Los primeros son descriptivos, describen que ocurre sin preguntarse cómo. Se derivan de datos observados sin involucrar procesos fisiológicos y tienen escasa capacidad explicativa, lo que resulta en un acercamiento de caja negra (Villegas *et al*., 2004). Mediante este acercamiento se identifican términos significantes desde el punto de vista físico del problema y se realiza un proceso estadístico-matemático hasta encontrar relaciones que representen adecuadamente una característica del cultivo con los parámetros escogidos. El inconveniente de este acercamiento es que el modelo ignora la mecánica del funcionamiento biológico y no explica los procesos mediante los cuales la planta responde ante los estímulos externos.

Un modelo mecanicista es más complejo e intenta describir los posibles mecanismos de los procesos internos y sus interacciones en la vía más fundamental. Este tipo de modelos suministran información de los procesos a través de los cuales son gobernados los fenómenos bajo estudio. En los modelos mecanísticos, los procesos que ocurren en el sistema forman la base del modelo. El crecimiento del cultivo expresado en este sentido entonces está construido sobre la base del conocimiento de los procesos fisiológicos, físicos y químicos inherentes y el efecto de los factores ambientales sobre estos. La mayor ventaja de los modelos mecanísticos es que ellos pueden ser transferidos a otro conjunto de condiciones y, por lo tanto, ofrecen más

posibilidades para manipular y mejorar el sistema, lo que lo hace ideal para construir diversos escenarios (De Wit, 1986; Link, 2005).

Los modelos de cultivos necesitan ser calibrados y validados para poder realizar simulaciones de la respuesta del cultivo a determinados factores.

Calibración

La calibración del modelo es el ajuste de los parámetros para que los valores simulados se comparen bien con los observados (Abou El-Enin *et al*., 2016).

El propósito de calibrar un modelo es obtener resultados de simulaciones precisas y de alta calidad que muestren un buen acuerdo con los datos medidos. Para esta tarea se utilizan varios estadígrafos, como la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE), el RMSE normalizado (RMSEn) y el índice de Willmott (d). Un modelo de simulación puede ser calibrado hasta que cumpla con todos estos criterios.

Validación

La validación es una de las principales etapas de un estudio de simulación (Benítez y Miranda, 2018). A través ella es posible determinar deficiencias en la calibración del modelo.

Una forma muy común de validar los modelos es observando la exactitud con que este predice datos históricos utilizando los estadígrafos descritos anteriormente.

Simulación

Varios autores plantean que un modelo de cultivo es la simulación dinámica del crecimiento del cultivo por el uso de la integración numérica de los procesos constituyentes con ayuda de las computadoras (Gálvez *et al*., 2010). Aunque en muchos trabajos suele verse la modelación y la simulación como un único proceso, estos deben diferenciarse (Torres y Ortíz, 2005), pues la modelación puede realizarse sin necesidad de la simulación, no así este último, el cual involucra el desarrollo de un

modelo y su uso para caracterizar el sistema y sus interacciones con un mayor grado de detalle.

La simulación puede ser definida como una técnica numérica para la realización de experimentos con determinados tipos de modelos matemáticos, los cuales describen el comportamiento de un sistema complejo dinámico, mediante el empleo de la computación (Torres *et al*., 2002).

La simulación constituye una técnica para imitar el funcionamiento de sistemas o procesos reales mediante programas de ordenador. Para estudiar el sistema suele ser necesario hacer algunas suposiciones sobre su forma de operar.

La simulación computarizada permite reducir tiempos, esfuerzos y recursos necesarios en la gestión agrícola. Los modelos de simulación de cultivos reproducen su comportamiento y permiten seleccionar distintos ambientes de simulación y analizar la respuesta ante estas variaciones.

Por otro lado, los modelos de simulación son herramientas que utilizan información obtenida a través de experiencias anteriores y permiten proyectar los resultados físicos y económicos, teniendo en cuenta todos los factores que interactúan en un determinado ambiente.

El número y los tipos de modelos de cultivo reportados por la bibliografía son bastante grandes; no sorprende que no exista un modelo de cultivo universal que se pueda adaptar a los diferentes sistemas, objetivos, procesos y condiciones ambientales. Existen modelos de simulación de cultivos específicos para un cultivo, por ejemplo, los modelos CERES-Wheat (Hodges y Ritchie, 1991) y CERES-Maize (Ritchie *et al*., 1989), para trigo y maíz, respectivamente. Para el caso del arroz existen CERES-Rice (Singh *et al*., 1993) y Oryza2000 (Bouman, 2001), entre otros.

Por otro lado, pueden ser modelos genéricos. Los genéricos pueden ser aplicados a varias especies mediante la utilización de parámetros específicos para cada cultivo. Algunos de estos modelos son DSSAT (Jones *et al*., 2003), EPIC (Jones *et al*., 1991), CROPSYST (Stöckle *et al*., 2003), APSIM (Keating *et al*., 2003) y STICS (Brisson *et al*., 1998), inclusive muchos de estos modelos son de libres acceso y utilización.

1.2.1. Modelo DSSAT

Desde 1983, un grupo internacional de científicos cooperantes han desarrollado modelos de simulación de cultivos, enfocados a proporcionar estimaciones realistas del comportamiento de los cultivos bajo diferentes estrategias de manejo y condiciones ambientales. Estos modelos se han combinado en un paquete, como parte de un programa de enlaces (*software shell*) conocido como DSSAT.

El modelo de crecimiento de cultivos DSSAT (Jones *et al*., 2003) es un modelo comercial, basado en Windows, en el cual se integran, en una misma plataforma, modelos específicos desarrollados independientemente para cada uno de los cultivos disponibles. Además, incluye herramientas y programas de utilidad para el manejo de suelos, recursos hídricos, clima, coeficientes genéticos, datos de cultivos y plagas. Es posible abordar el análisis de monocultivos en los cuales se pueden simular condiciones de rotación, interacciones con factores bióticos y abióticos, entre otros.

El programa está compuesto por cinco módulos, cuyo centro son los modelos de cultivo y se relacionan con las bases de datos de clima, suelo, genética, entre otras; el software de soporte; aplicaciones que incluyen relación con SIG y análisis estadísticos y, finalmente, la interface con el usuario. DSSAT se puede utilizar como una herramienta de apoyo a la decisión para pruebas de rendimiento en múltiples ubicaciones que optimizan el manejo de fertilizantes con nitrógeno para un rendimiento específico del cultivo, minimizan las pérdidas de nutrientes y seleccionan ventanas de siembra óptimas.

DSSAT se ha utilizado cada vez más como una herramienta para comparar el rendimiento de diferentes sistemas de cultivo y para estudiar la agricultura de precisión en el marco de un sistema de apoyo a la decisión que automatiza las simulaciones utilizando diferentes estrategias de manejo de cultivos (Corbeels *et al*., 2016). Es necesario comprender que el comportamiento de crecimiento y el rendimiento de los principales cultivares de arroz dependen, principalmente, de los coeficientes genéticos de una variedad particular. Para este propósito, existe la necesidad de calibrar y validar el modelo DSSAT para su aplicación posterior en los estudios de evaluación de impacto del cambio climático, evaluación de riesgos y determinar estrategias de manejo debido a su capacidad para predecir el crecimiento y el rendimiento de los cultivos (Dias *et al*., 2016).

El modelo ha sido probado en una amplia gama de entornos por la Red Internacional de Sitios de Referencia para la Transferencia de Tecnología Agrícola (IBSNAT) (Singh *et al*., 1988). Incorpora coeficientes que explican las variaciones genotípicas en términos de fenología, fisiología y atributos genéticos (Hunt *et al*., 1989). Estos coeficientes genéticos se requieren como entradas del modelo y varían ampliamente entre las diferentes variedades (Abou El-Enin *et al*., 2016).

En Cuba este modelo se ha utilizado en varias investigaciones para el análisis de las respuestas de las interacciones planta-ambiente-manejo en distintos escenarios de la producción de cultivos de cereales en Cuba. El modelo se calibró y validó para las condiciones de estudio y posteriormente se simuló el rendimiento de cada cultivo en dos escenarios futuros (2025 y 2050). La calibración y validación del modelo demostró la factibilidad de su utilización en las condiciones de estudio para la predicción del rendimiento y sus componentes. En los escenarios simulados se alcanzaron rendimientos que oscilaron entre 63.8 % y 22,8 %, con relación al rendimiento medio potencial en los experimentos, en dependencia del cultivo y el año simulado (Hernández *et al*., 2016). También Tuero *et al*. (2018) lo utilizaron para establecer estrategias de riego para el cultivo de la soya, estableciendo el 15 de julio como fecha

óptima de siembra para la variedad Júpiter y como mejor estrategia de riego la que aplica 10 mm de agua al 85% de la capacidad de campo

Para la corrida del modelo de simulación DSSAT es necesario contar con información de datos de clima diario, del cultivo y del suelo, los cuales también se corresponden con archivos de entrada vinculados a la estructura principal del modelo (Figura 1) (Corbeels *et al*., 2016).

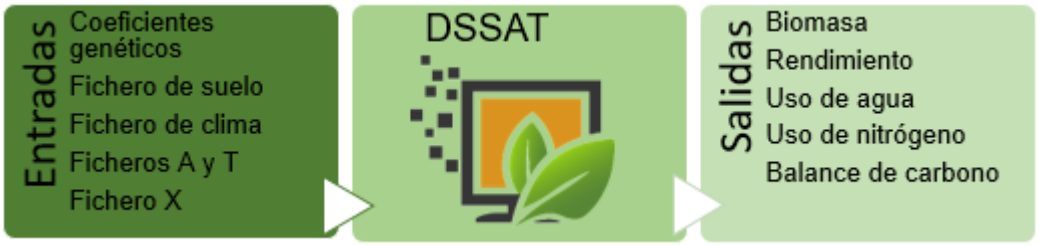


Figura 1: Estructura de DSSAT (Jones *et al*., 2003)
Fuente: Elaboración propia

El fichero X almacena datos de las condiciones de campo, los tratamientos experimentales y las opciones de simulación. La mayor parte de este fichero son los datos de manejo de la producción de cultivos, separados en varias secciones; por ejemplo, cultivo de arroz, detalle de siembra, método de riego, aplicación de fertilizantes orgánicos e inorgánicos, labranza, cosecha y secciones de aplicación química.

En la sección de opciones de simulación se define la fecha de inicio de simulación, las opciones para activar los módulos de agua y nitrógeno, método de cálculo para el clima, balance hídrico y fotosíntesis. La salida también se puede enmarcar en la sección de opciones de simulación.

Los ficheros A y T almacenan los valores observados en el experimento relacionados con la fenología del cultivo y los procesos de crecimiento, los que se compararán con los valores simulados y se utilizarán, además, para estimar los coeficientes genéticos.

El fichero A almacena los valores de las observaciones seleccionadas de cada tratamiento en el experimento en la cosecha, mientras que el fichero T almacena los valores de las series de tiempo en una etapa fenológica determinada, observada durante la temporada de crecimiento de cada tratamiento.

1.2.2 Coeficientes genéticos

El modelo CERES–Rice para DSSAT necesita ser calibrado mediante la obtención de ocho coeficientes genéticos (P1, P2O, P2R, P5, G1, G2, G3 y G4). Los coeficientes P son los que consideran aspectos fenológicos del cultivo, como la floración y la maduración. Los coeficientes G están relacionados con el rendimiento potencial de una variedad específica (Satapathy *et al*., 2014) (Tabla 1).

Tabla 1. Descripción de los coeficientes genéticos de CERES-Rice

Coeficiente	Definición	Unidad
P1	Grados días de calor acumulado a partir de la emergencia de las plántulas durante el cual la planta de arroz no responde a los cambios en el fotoperíodo.	ºC
P2O	Fotoperíodo crítico o la duración más larga del día en la que el desarrollo ocurre a una velocidad máxima.	Horas (h)
P2R	Grado en que el desarrollo fásico que conduce a la iniciación de la panícula se retrasa por cada hora de incremento en el fotoperíodo por encima de P2O.	ºC
P5	Grados días de calor acumulado desde el comienzo de llenado del grano hasta la madurez fisiológica.	ºC
G1	Número de espiguillas, potencial estimado a partir del número de espiguillas por gramo de peso seco del culmo principal en antesis. Un valor típico es 55.	Espiguillas por gramos

G2	Peso de un grano en condiciones ideales de cultivo, es decir, luz, agua y nutrientes no limitantes y ausencia de plagas y enfermedades.	gramos
G3	Coeficiente de ahijamiento relativo al cultivar IR64 bajo condiciones ideales. Un cultivar de ahijamiento más alto tendría un coeficiente mayor que 1,0.	-
G4	Coeficiente de tolerancia de temperatura, usualmente 1,0 para las variedades cultivadas en ambientes normales. G4 para el cultivo de arroz tipo japónica en un ambiente más cálido sería 1,0 o mayor. Del mismo modo, el valor de G4 para el arroz tipo índica en ambientes o temporadas muy fríos sería menor que 1,0.	-

Fuente: Elaboración propia con información tomada de Lamsal *et al*. (2013)

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Como se mencionó en el epígrafe 1.2, los modelos de cultivos tienen un principio de trabajo que va desde la calibración, pasando por la validación, hasta la simulación. Para desarrollar esta investigación se dividió el trabajo en dos etapas; la primera para realizar la calibración del modelo mediante la obtención de los valores de los coeficientes genéticos de la variedad de arroz estudiada y la segunda para efectuar las simulaciones del rendimiento al utilizar diferentes dosis de nitrógeno y realizar la evaluación económica.

2.1. Calibración

Para obtener los valores de los coeficientes genéticos de la variedad de arroz J-104 se tomaron datos de experimentos desarrollados en la Unidad Científico Tecnológica de Base Los Palacios (UCTB-LP), perteneciente al Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas; situada en la llanura sur de la provincia Pinar del Río (22°44' de latitud Norte y 83°45' de longitud Oeste, a 60 msnm). Se utilizaron tres fechas de siembra correspondientes a la época de frío o poco lluviosa, que en Cuba abarca desde noviembre a febrero (MINAG *et al*., 2014) (Tabla 2).

Tabla 2. Fechas de siembra utilizadas en los experimentos.

No	Época de frío o seca (noviembre-febrero)		
	Día	Mes	Año
1	15	enero	2004
2	2	diciembre	2004
3	10	febrero	2005

Fuente: Elaboración propia

Se empleó la variedad J-104, de ciclo medio, que presenta un tipo de planta índica semienana. Sus hojas son de color verde intenso, buen vigor inicial y alta capacidad de ahijamiento; se destaca por su alto potencial de rendimiento; por estas razones se

convierte en la favorita de los productores. Las principales características del cultivo en estudio se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Principales características biológicas de la variedad de arroz J-104.

Progenitores	IR480-5-9-2/IR30-16-1
Respuesta predominante al fotoperíodo	Insensible
Duración del ciclo (días)	
Época “poco lluviosa”	150
Época “lluviosa”	133
Clasificación según el ciclo	Medio
Altura de la planta (cm)	101,5
Longitud de la panícula (cm)	26,7
Número de granos por panícula	127
Masa de mil granos (g)	31
Rendimiento potencial (t ha^{-1})	
Época “poco lluviosa”	8,5
Época “lluviosa”	5,9

Fuente: Elaboración propia con información tomada Puldón *et al*. (2001)

La siembra se realizó a voleo, con una norma de 120 kg ha^{-1} de semillas para asegurar al menos 320 plantas por m^2. Se utilizaron parcelas experimentales de 64 m^2 de superficie y cuatro repeticiones.

Las labores fitotécnicas se realizaron según lo recomendado en el Instructivo Técnico del Cultivo del Arroz (MINAG, 2001). Se aseguró la disponibilidad de agua durante todo el ciclo del cultivo. El control de plagas y arvenses se realizó de manera efectiva y la fertilización se efectuó mediante la aplicación de K_2O y P_2O_5 de fondo, a razón de 60 kg ha^{-1} de ambos y 100 kg ha^{-1} de nitrógeno, fraccionados durante el ciclo del cultivo donde se aplicó el 25 % del total en cada fertilización. Se utilizaron como portadores

el superfosfato triple (46 % de P_2O_5), el cloruro de potasio (60 % de K_2O) y la urea (46 % de N) (MINAG, 2001).

Recolección de los datos

La duración en días de las tres fases fenológicas del cultivo se evaluó en cada parcela experimental. La planta de arroz tiene tres fases vegetativas principales: la fase vegetativa, comprende los días transcurridos desde la emergencia hasta el punto de algodón; la fase reproductiva, desde el punto de algodón hasta que finaliza la etapa de antesis; y la maduración, desde la antesis hasta la madurez del grano.

Cada fase se identificó cuando más del 50 % de la parcela experimental mostró las características de estas etapas, según lo descrito en la Tabla 4. También se determinó la duración en días de diferentes etapas (fecha de emergencia, fecha de antesis y fecha de madurez fisiológica) dentro de cada fase y se estableció el ciclo del cultivo mediante la sumatoria de la duración de cada una de ellas (CIAT, 1985).

Tabla 4. Descripción de cada una de las etapas de las diferentes fases del desarrollo en el cultivo del arroz (*Oryza sativa* L.).

Fases	Etapas	Descripción de las etapas
Vegetativa	Plántula	Desde la emergencia hasta la cuarta hoja
	Inicio de ahijamiento	Aparición de los hijos primarios que emergen secuencialmente del primero, segundo y tercer entrenudos del tallo principal
	Ahijamiento activo	Aparición de los hijos secundarios y terciarios que emergen secuencialmente del primero, segundo y tercer entrenudos de los tallos primarios
	Máximo ahijamiento	Se alcanza el número máximo de hijos

Reproductiva	Punto de algodón	Cuando el primordio o embrión panicular está situado justo por encima del nivel del suelo rodeado por las hojas y aparece una estructura cónica plumosa de 0,5 a 1,5 mm de longitud
	Iniciación y diferenciación de la panícula	Del primordio se diferencian las espiguillas, las cuales forman con el raquis la inflorescencia que crece dentro de la vaina de la hoja bandera
	Paniculación	Cuando emerge la panícula de la vaina de la hoja bandera
	Antesis	Salida de las anteras; primero ocurre en el tercio superior y después en el tercio inferior
Maduración	“Lechoso”	Granos de un color verde y la panícula, cuando se sostiene vertical, se dobla en un arco de 90°
	Pastoso	La consistencia del grano cambia primero a pastosa suave y luego se endurece. El color de la espiga cambia a verdoso amarillento, la panícula dobla su punta en un arco de 180°
	Madurez del Grano	Cuando el 90 % de los granos han madurado y muestra un color rojo pajizo

Fuente: Elaboración propia con información tomada de CIAT (1985).

La determinación del rendimiento agrícola y sus componentes (número de panículas por m^2, número de granos por panícula, porcentaje de granos vanos y masa de 1000 granos) se realizó en cada parcela experimental, según lo recomendado por Amador y Peña (1986). Se tomó un área de 1 m^2, con dos repeticiones en cada réplica y los valores se expresaron en t ha^{-1}, al 14 % de humedad del grano. Para las panículas por m^2, se empleó el método de conteo en un área de 0,50 m^2, con cuatro repeticiones por parcela. Para el número de granos por panícula, se tomaron al azar 20 panículas; estas se desgranaron, se separaron los granos vanos de los llenos y se contaron. Para determinar el porcentaje de granos vanos se utilizó la fórmula (Ecuación 1) propuesta

por Yoshida *et al*. (1976). Para la masa de 1000 granos se tomaron dos muestras por parcela de 1000 granos llenos, que se pesaron en una balanza analítica.

$$PGV = \frac{V}{(Ll + V)} * 100 \qquad (1)$$

donde PGV es el porcentaje de granos vanos, V es la cantidad de granos vanos y Ll es la cantidad de granos llenos en la panícula.

Se calcularon las medias, la desviación estándar y el coeficiente de variación de las variables estudiadas en cada experimento. Se aplicó un análisis de varianza simple y las diferencias significativas entre fechas de siembra se verificaron por la prueba de rango múltiple de Tukey *0,05*. Para el análisis estadístico de los datos se utilizó el software SPSS para Windows, versión 21.0 (IBM, 2007).

Preparación de los ficheros de entrada

Se crearon seis ficheros de entrada para correr el modelo CERES-Rice insertado en DSSAT v4.6: fichero X (Anexo 1), fichero A (Anexo 2), fichero T (Anexo 3), fichero de suelo, fichero de clima y fichero de coeficientes genéticos (Anexo 4).

En los ficheros A y T se almacenaron los valores de las variables fisiológicas observadas en los experimentos y, posteriormente, se compararon con los valores simulados por el modelo para la calibración.

En el fichero X se almacenaron datos de las condiciones de campo, tratamientos experimentales y opciones de simulación. La mayor parte de este fichero son los datos de manejo de la producción de cultivos, separados en varias secciones.

El suelo del área donde se desarrollaron los experimentos se clasifica como Hidromórfico Gley Nodular Ferruginoso Petroférrico, según la Clasificación de los Suelos de Cuba 2015 (Hernández *et al.*, 2015). Las técnicas analíticas utilizadas para

las determinaciones realizadas al suelo de la UCTB Los Palacios fueron: pH: Potenciometría, relación suelo:agua 1:2,5; materia orgánica (MO) por el método de Walkley y Black; cationes intercambiables, a partir de una extracción con $NH_4CH_3CO_2$ 1 mol L^{-1} a pH 7 y determinación por complejometría (Ca^{2+} y Mg^{2+}) y fotometría de llama (Na^+ y K^+); fósforo asimilable (P) según el método de Oniani (solución extractiva H_2SO_4 0,1 N) y determinación de nitrógeno total, según lo descrito en el Manual de técnicas analíticas para análisis de suelo, foliar, abonos orgánicos y fertilizantes químicos (Paneque, 2010). Las propiedades físicas y químicas del suelo del sitio experimental se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Propiedades físicas y químicas del suelo del sitio experimental.

Profundidad (cm)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	MO* (%)	pH	CIC** (cmol/kg)	Nitrógeno (%)
0-15	10,4	11,1	78,5	2,9	5,4	8,2	0,21
15-30	11,6	8,1	80,3	2,4	5,3	13,2	0,19
30-50	24,1	8,4	67,5	1,7	5,2	17,4	0,14
50-70	39,1	8,0	52,9	0,9	5,0	25,4	0,08
70-100	51,3	7,9	40,8	0,5	4,8	30,7	0,05
Promedio	27,3	8,7	64	1,68	5,14	18,98	0,13

*MO: Materia orgánica **CIC: Capacidad de intercambio catiónico

Fuente: Elaboración propia

Para la confección del fichero de clima se utilizaron los valores de las variables meteorológicas (temperaturas máximas y mínimas y precipitaciones diarias) de los meses en que se desarrollaron los experimentos, obtenidas de la Estación Meteorológica de Paso Real de San Diego, en Los Palacios, a unos 3 km aproximadamente del área experimental (Figura 2, 3 y 4).

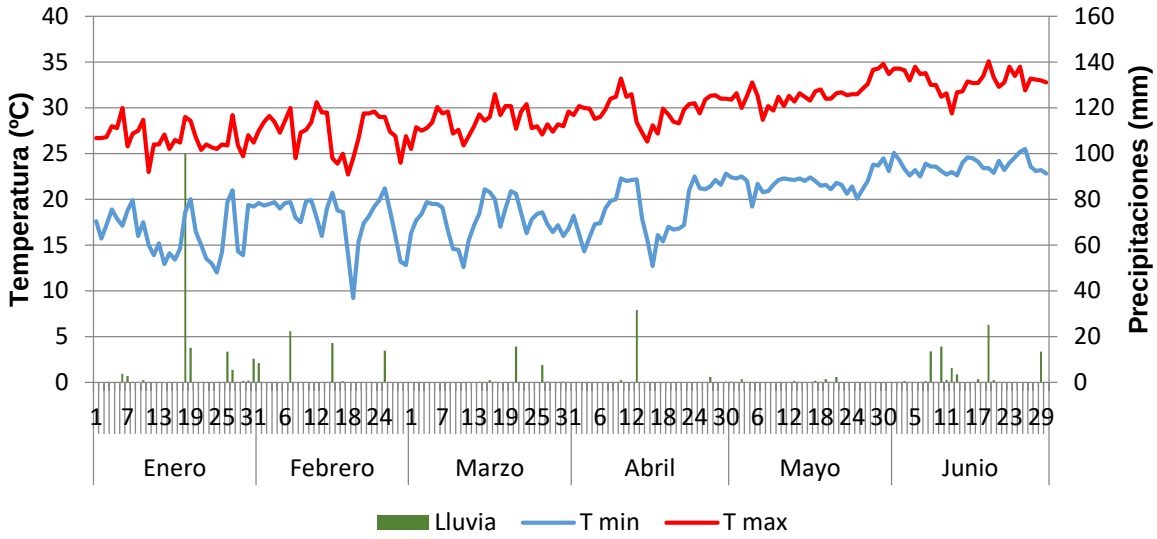


Figura 2: Comportamiento de las variables meteorológicas diarias para el experimento realizado en enero de 2004

Fuente: Elaboración propia

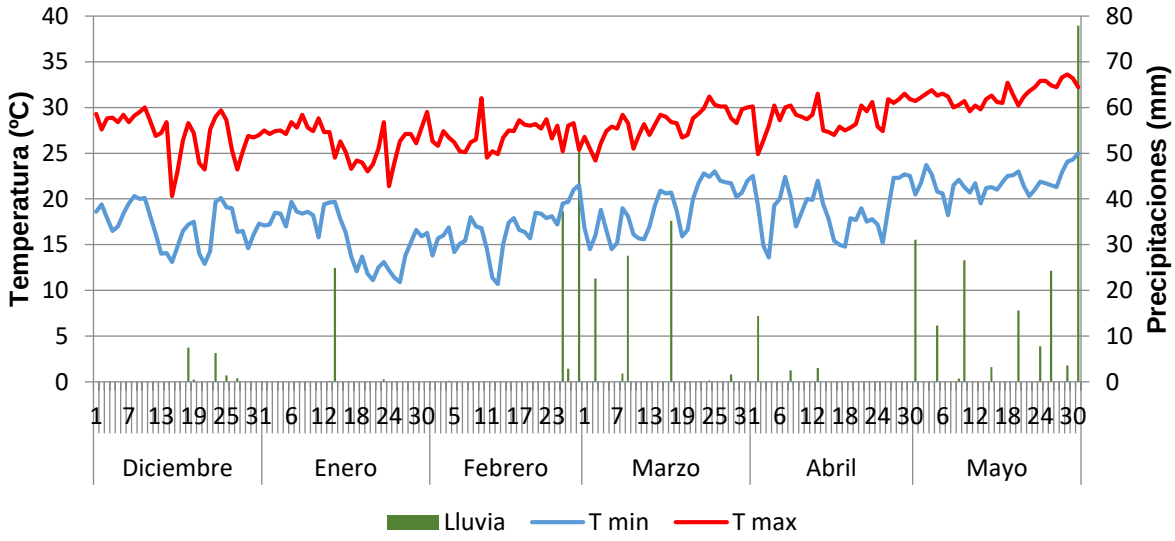


Figura 3: Comportamiento de las variables meteorológicas diarias para el experimento realizado en diciembre de 2004

Fuente: Elaboración propia

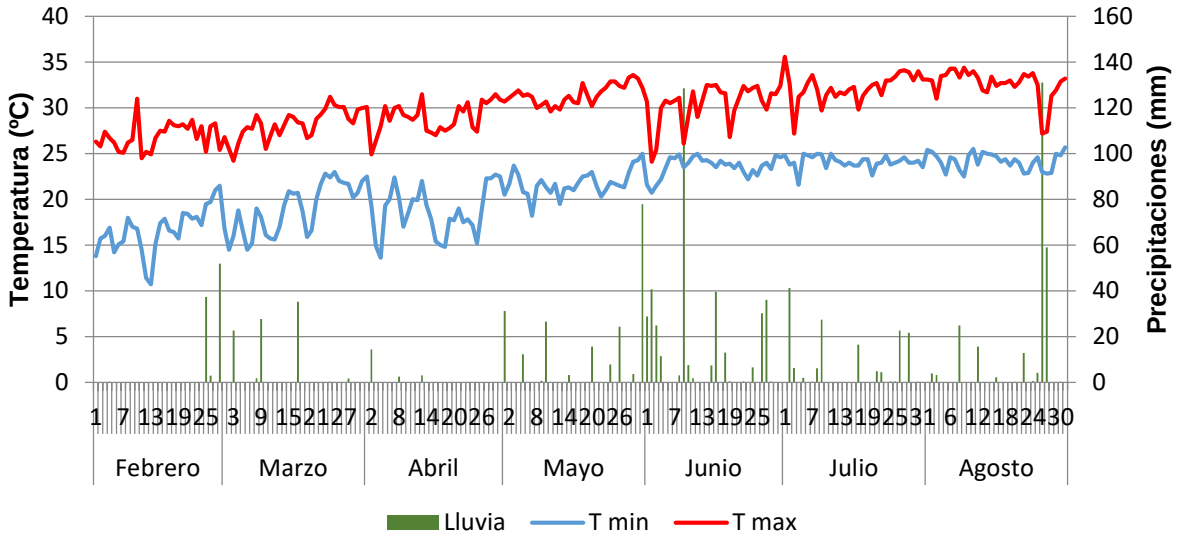


Figura 4: Comportamiento de las variables meteorológicas diarias para el experimento realizado en febrero de 2005
Fuente: Elaboración propia

En el presente estudio, los datos de radiación global no estaban disponibles y, por lo tanto, la radiación solar se estimó utilizando temperaturas máximas y mínimas; los procedimientos están descritos en (Allen et al., 1998)

Calibración del modelo

El cálculo de los grados días de calor acumulado (GDCA) (Ecuación 2) se realizó teniendo en cuenta la duración de las etapas y las fases fenológicas que alcanzó el cultivo en las diferentes fechas de siembra y los registros de temperaturas, mediante la sumatoria de los grados días de calor (GDC) (Rodríguez y Flores, 2006).

$$GDCA = \sum \frac{Tmáx - Tmín}{2} - Tbase \qquad (2)$$

donde: $Tmáx$ es la temperatura máxima diaria del aire; $Tmín$ es la temperatura mínima diaria del aire y $Tbase$ es la temperatura base en que el proceso de interés no se desarrolla y se tomó en este caso 9 ºC.

CERES-Rice simula el rendimiento y la biomasa utilizando las siguientes ecuaciones (Ecuaciones 3, 4 y 5) (Lamsal *et al*., 2013):

$$Y = I_H nR \sum_{i=1}^{N} (Q_{dPARi} R_n f_i \Delta_{Ri}) \qquad (3)$$

donde: Y es el rendimiento del grano, I_H es el índice de cosecha (cociente de la masa seca de granos entre la masa seca de la parte aérea de la planta), nR el valor del Uso de la Eficiencia de la Radiación (RUE) (g MJ^{-2}), Q_{dPARi} promedio diario total de Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR) incidente para un mes dado (MJ m^{-2}), R_n número de días de radiación interceptada, f_i es la fracción de la PAR interceptada por el cultivo, Δ_{Ri} fracción de la RUE máxima en función del rendimiento del cultivo (g MJ^{-2}), N es el número de meses.

De manera similar, la producción total de biomasa (g) (Ritchie *et al*., 1986) estará acompañada por la tasa de crecimiento promedio (B_T) y la duración del crecimiento (d)

$$B_T = g \times d \qquad (4)$$

Donde el crecimiento de la planta se determina como

$$CARBO = RUE \times PAR \times (1 - e^{-k \times LAI}) \qquad (5)$$

donde $CARBO$ es la fotosíntesis neta, k es el coeficiente de extensión y LAI es el índice de área foliar. El valor de RUE se asume como 2,95 g MJ^{-1}, donde el rango de temperatura es de 14-32ºC.

Los coeficientes se obtuvieron secuencialmente: primero los parámetros de desarrollo fenológico relacionados con las fechas de antesis y maduración, seguidos por los

parámetros de crecimiento del cultivo, como números de granos por panícula, peso de un grano y rendimiento del grano, entre otros, como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6: Influencia de los coeficientes genéticos en los indicadores fisiológicos del cultivo

Coeficientes	Indicadores fisiológicos
P1, P2O, P2R	Antesis
P5	Maduración
G1, G2	Rendimiento del grano
G1	Número de granos
G2	Peso de un grano
G3, G4	Número de hijos

Fuente: Elaboración propia con información tomada de DSSAT (Jones et al., 2003)

Los coeficientes se ajustaron mediante el método manual de prueba y error hasta que se logró un RMSEn menor que 5% entre los valores observados en los experimentos y los simulados por el modelo, en las fechas de antesis y madurez fisiológica, masa de 1000 granos y rendimiento del grano (Lamsal *et al*., 2013).

Se calcularon además la RMSE y el índice d de acuerdo con Willmott (1982), con las siguientes ecuaciones (Ecuaciones 6, 7 y 8):

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{(Si - Oi)^2}{n}} \qquad (6)$$

$$RMSEn = 100 * \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{(Si - Oi)^2}{n}}}{\overline{Ob}} \qquad (7)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Si - Oi)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|Si - \overline{Ob}| + |Oi - \overline{Ob}|)^2} \qquad (8)$$

donde Si y Oi - valores simulados y observados, n es el número de observaciones; $\overline{Ob}$ – media de los valores de Oi.

Es factible utilizar las ecuaciones anteriores, ya que la $RMSE$ es una herramienta útil para probar la bondad de ajuste de modelos de simulación y representa una medida global entre los valores observados y simulados; el valor más cercano a cero indica un desempeño bueno en la simulación (Ray *et al*., 2018).

La $RMSEn$ se usó para dar una medida porcentual de la diferencia relativa entre los valores simulados y observados en las fechas de antesis y madurez fisiológica, masa de 1000 granos y rendimiento del grano. Una simulación puede ser considerada de Excelente si el $RMSEn$ es menor que el 10 %, Buena si se encuentra entre 10 % y 20 %, Razonable si está entre 20 % y 30 % y Malo si es mayor que 30 % (Raes *et al*., 2018). Por su parte, Willmott (1982) plantea que d debe estar próximo a 1.

2.2. Simulación

Para realizar las simulaciones se tomó el fichero del experimento realizado en enero de 2004 y se introdujo en la herramienta de análisis estacional incluida en DSSAT. El análisis de sensibilidad del rendimiento del grano a los niveles de aplicación de fertilizante nitrogenado se llevó a cabo creando seis experimentos donde se variaron las dosis del fertilizante de 150 a 200 kg ha^{-1} de nitrógeno con un intervalo de 10 kg ha^{-1} de nitrógeno y se mantuvieron constantes los demás parámetros del modelo como se definieron en la calibración.

Para la simulación con las diferentes dosis de nitrógeno se seleccionaron las fases fenológicas de cuarta hoja, inicio de ahijamiento, ahijamiento activo y punto de algodón (MINAG *et al*., 2014) en las fechas descritas por Franco y Ramírez (2000) y el

porcentaje de los fraccionamientos se calcularon a partir de la dosis recomendada en el Instructivo Técnico del Arroz (MINAG *et al*., 2014) para obtener un rendimiento de 6 t ha^{-1}. Una descripción detallada se puede apreciar en la Tabla 7.

Tabla 7: Fraccionamiento utilizado y momento de aplicación de la dosis de nitrógeno.

Fase fenológica	% de la dosis	Momento de aplicación (dde)
Cuarta hoja	20	7
Inicio ahijamiento	25	31
Ahijamiento activo	25	59
Punto de algodón	30	86

Fuente: Elaboración propia

Se realizó la corrida del modelo para obtener los valores de rendimiento del grano para estos experimentos y se compararon para determinar el mejor de ellos.

2.3. Análisis económico

Se introdujeron los precios de costo de la semilla básica, del fertilizante nitrogenado y el precio del arroz en el mercado en la herramienta de análisis económico incluida en DSSAT.

Los precios de semilla básica y precio del arroz en el mercado se obtuvieron de la UCTB Los Palacios, correspondientes a los que se comercializan por la entidad. El precio de la urea se tomó del sitio oficial de MERCOSUR (Mercosur, 2019) . Para este análisis se ignoraron los costos de los demás componentes que se pueden incluir en el estudio de factibilidad económica por no tener información detallada de los mismos (Tabla 8).

Tabla 8: Importe de los artículos utilizados en el análisis económico

Artículo	Importe
Grano ($ kg^{-1})	7275.25
Semilla ($ kg^{-1})	14.30
Fertilizante nitrogenado ($ kg^{-1})	5.67
Otros fertilizantes y su aplicación	0.00
Riego y su aplicación	0.00

Fuente: Elaboración propia

Se realizó la corrida del modelo para obtener los ingresos totales para estos experimentos y se compararon para determinar cuál generó mayor utilidad.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Calibración

El comportamiento del rendimiento agrícola y sus principales componentes aparece en las tablas 8, 9 y 10, para las épocas de siembra enero de 2004, diciembre de 2004 y febrero de 2005, respectivamente.

En la siembra realizada en enero de 2004 (Tabla 9) se observa que los rendimientos oscilaron entre 3,2 t ha^{-1} y 3,8 t ha^{-1}; se obtuvo un rendimiento promedio de 3,55 t ha^{-1} con un coeficiente de variación de 0,07. La cantidad de granos llenos tuvo una media de 102,25 granos por panícula con un coeficiente de variación de 0,05; los valores de este indicador se comportaron entre 96 y 108 granos por panícula. La variable granos vanos por panícula se presentó en el rango de 12 a 20 granos; una media de 16,25 y un coeficiente de variación de 0,22. Para este tratamiento el porcentaje de granos vanos fue de 14 %.

Para la siembra efectuada en diciembre de 2004 (Tabla 10), el rendimiento promedio logrado fue de 4,3 t ha^{-1} con un coeficiente de variación de 0,10. El número de granos llenos por panícula osciló entre 74 y 78 con una media de 76 granos llenos y un coeficiente de variación de 0,02. El número de granos vanos se comportó entre 11 y 16, una media de 14 granos vanos por panícula y un coeficiente de variación de 0,15. En este mes los granos vanos tuvieron una presencia de 16 %.

En el último mes del experimento (Tabla 11) se alcanzó un rendimiento promedio de 4,04 t ha^{-1} con un coeficiente de variación de 0,07. Los granos llenos por panícula variaron entre 103 y 130 con una media de 120 y un coeficiente de variación de 0,10. La variable número de granos vanos por panícula tuvo un valor promedio de 21,75 con un coeficiente de variación de 0,18. En este caso se obtuvo un porcentaje de vaneo del 15 %.

Tabla 9: Medidas de dispersión y tendencia central del rendimiento (t ha^{-1}) y sus principales componentes para el experimento realizado en enero de 2004

	GLL	GV	MASA	REND
Réplica 1	96	18	25	3,2
Réplica 2	104	20	24	3,7
Réplica 3	101	15	25	3,8
Réplica 4	108	12	26	3,5
Media	102,25	16,25	25,00	3,55
CV	0,05	0,22	0,03	0,07

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10: Medidas de dispersión y tendencia central del rendimiento (t ha^{-1}) y sus principales componentes para el experimento realizado en diciembre de 2004

	GLL	GV	MASA	REND
Réplica 1	78	16	23	4,7
Réplica 2	74	15	25	4,8
Réplica 3	77	11	28	3,7
Réplica 4	75	14	24	4
Media	76,00	14,00	25,00	4,30
CV	0,02	0,15	0,09	0,10

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11: Medidas de dispersión y tendencia central del rendimiento (t ha^{-1}) y sus principales componentes para el experimento realizado en febrero de 2005

	GLL	GV	MASA	REND
Réplica 1	103	18	23	4.2
Réplica 2	128	27	25	4.35
Réplica 3	130	22	26	3.91
Réplica 4	119	20	26	3.71
Media	120,00	21,75	25,00	4,04
CV	0,10	0,18	0,06	0,07

Fuente: Elaboración propia

De manera general, se puede observar que los indicadores que mayor variabilidad tuvieron fueron el rendimiento de la siembra realizada en diciembre de 2004, el número de granos llenos por panícula de febrero de 2005 y el número de granos vanos por panícula de enero de 2004. Para las tres fechas de siembra la masa de 1000 granos tuvo un valor promedio de 25 gramos y la mayor variabilidad se observó en el mes de diciembre de 2004.

El estudio de comparación de medias (Tabla 12) determinó que los indicadores estudiados variaron para las diferentes fechas de siembra. Esto demuestra el papel que juega la interacción de la temperatura en la formación de dichos indicadores para un cultivar determinado.

Tabla 12: Estudio de comparación de medias

Experimento	G. llenos por paníc.	G. vanos por paníc.	Masa de 1000 granos	Rend
Enero de 2004	102,25 b	16,25 ab	25	3,55 a
Diciembre de 2004	76 a	14 a	25	4,3 b
Febrero de 2005	120 c	21,75 b	25	4,042 ab

Letras desiguales difieren significativamente (p≤0,05) según Prueba de Rangos Múltiples de Tukey

Fuente: Elaboración propia

El rendimiento del grano tuvo una tendencia a la disminución en la medida en que se avanza en el calendario de siembra para la época “poco lluviosa”. En Cuba los rendimientos agrícolas en el cultivo del arroz varían significativamente entre los meses de siembra y se informa que las siembras realizadas en la época “poco lluviosa” resultan ser las de mayores rendimientos e incluso con un comportamiento más estable (MINAG *et al.*, 2014). En este sentido, los resultados del presente trabajo están en correspondencia con lo planteado anteriormente en la literatura, puesto que de manera general los valores de rendimientos alcanzados en las fechas de siembra estudiadas resultan inferiores a los que se alcanzaron en estudios similares en las

fechas de la época “poco lluviosa” los cuales superan las 5 t ha^{-1} (Maqueira *et al*., 2016). Otros autores (Sánchez *et al*., 2016; Ray *et al*., 2018) también marcan al rendimiento como sensible a las variaciones de la temperatura y, en el caso específico de Cuba, este indicador tuvo un comportamiento similar a otro estudio realizado en la misma localidad y fechas de siembra (Sánchez *et al*., 2016).

En la mayoría de los casos, la cantidad de granos totales por panícula (granos vanos más granos llenos) no superó lo informado en la literatura (Tabla 3); además, existieron diferencias en cuanto al comportamiento de este indicador en las distintas fechas de siembra. El porcentaje de vaneo de los granos se comportó alrededor del 15 %, valor aceptable para los cultivares sembrados en Cuba (MINAG *et al*., 2014).

Al respecto, en trabajos realizados en Cuba se ha demostrado que la cantidad de panículas por m^2 es el componente más variable y, generalmente junto a los granos llenos por panícula, es la causa principal que limita el rendimiento agrícola en el país (MINAG *et al*., 2014); además, atendiendo a lo señalado por Briceño y Álvarez (2010), quienes establecen que los aspectos relacionados con la panícula (número de ramas primarias, secundarias, número de granos llenos, masa de los granos, entre otros) varían de acuerdo con diferentes factores como época de siembra, nutrición y, principalmente, por el tipo de cultivar y sus características de crecimiento.

Por tal motivo, será necesario ajustar las densidades de siembra, teniendo en cuenta las características del crecimiento de un cultivar en determinada localidad, con vistas a lograr un valor adecuado de tallos fértiles, lo que resulta elemental para asegurar altos rendimientos. Este aspecto corrobora los resultados de Polón *et al.* (2012), que resaltan a los tratamientos en los que se alcanzaron mayor población de plantas, como los de mayores rendimientos. Algunos autores (Cuevas, 1999; Polón y Castro, 1999; Yamagata, 1999; Polón *et al*., 2003), señalaron la relación directa que existe entre la población de plantas, que finalmente posibilitan un mayor número de panículas por m^2 y de rendimiento.

Toda esta variabilidad encontrada puede estar relacionada con la duración de las fases y el comportamiento del clima en el período que duraron las mismas. Por lo que combinar esto en un cultivar para que presente el carácter de precocidad, los niveles óptimos en el ahijamiento y la capacidad de rendimiento es todavía un desafío para los mejoradores.

La Tabla 13 muestra la cantidad de días necesarios para alcanzar las etapas de antesis y madurez del grano, según los meses de siembra. Sobre la duración del ciclo hay que destacar que el cultivar, al ser sembrado en diciembre de 2004 y febrero de 2005, tuvieron una mayor duración que cuando fue sembrado en enero 2004; aspecto que pudiera tener relación con los valores de rendimiento agrícola alcanzados en esa fecha.

Tabla 13: Cantidad de días que necesita la variedad para alcanzar la antesis y la maduración.

Siembra	días a la antesis	días a la maduración
ene-04	140	159
dic-04	144	177
feb-05	146	187

Fuente: Elaboración propia

Al respecto (Maqueira *et al*., 2018) encontraron una fuerte asociación entre la duración de la fase reproductiva y el rendimiento; ya que es en esta fase donde se decide la cantidad de panículas y el total de granos por panícula en cada cultivar. En la literatura no siempre se destaca la influencia positiva y significativa del rendimiento con la duración de fases finales del desarrollo, y se resalta en mayor medida la fase vegetativa (Degiovanni *et al*., 2010). Estos autores están a favor del estímulo de vigor precoz que pueden alcanzar las plantas durante la fase vegetativa porque garantizan una mayor acumulación de masa seca desde edades tempranas y esto contribuye

positivamente al rendimiento. Otros autores (Martinez-Eixarch *et al*., 2015), a pesar de esto, consideran que el crecimiento vegetativo excesivo en los primeros estadíos provoca una disminución de la captación de la radiación solar, ya que puede llegar a existir un área foliar exagerada. Además, agregan que se aumenta la mortalidad de tallos, se debilita el proceso de maduración e incrementa el riesgo de encamado; aspectos que por lo general, no supone ninguna ventaja al cultivo o incluso reduce su rendimiento (Martinez-Eixarch *et al*., 2015).

La variedad J-104 se clasifica como una variedad de ciclo medio, cuya duración se encuentra entre 130-150 días, solo en época “poco lluviosa” (MINAG, 2008). Sin embargo, en el estudio realizado, en todos los casos el ciclo del cultivo superó los 150 días. Al considerar este comportamiento, no se debe establecer un patrón regular en cuanto a la duración del ciclo de los cultivares, ya que depende, en gran medida, de las fechas de siembra que se utilicen para el cultivo.

Polón *et al*. (2006) informaron un alargamiento del ciclo del cultivo en los cultivares INCA LP-5 y J-104 en la época “poco lluviosa”. Sin embargo, en los trabajos realizados por estos autores no se precisaron las causas de este comportamiento, tampoco si existieron variaciones en la duración de las fases, las que también pueden contribuir al alargamiento del ciclo.

Los valores de los coeficientes genéticos que determinan el crecimiento vegetativo y reproductivo para la variedad J-104 se presentan en la Tabla 14. Estos resumen, cuantitativamente, cómo una variedad particular responde a los factores ambientales. Los valores determinados se encuentran en el rango de valores que se describen en el Manual de Usuario de CERES-Rice (Singh *et al*., 1993).

Tabla 14: Valores de los coeficientes genéticos para la variedad J-104

P1 (ºC)	P2O (h)	P2R (ºC)	P5 (ºC)	G1 (espiguillas por gramo)	G2 (g)	G3	G4
600,0	10,00	200,4	350,5	45,11	0,025	1,00	1,129

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 15 se muestran la comparación de los valores observados y simulados, en cuanto a rendimiento de grano, masa de 1000 granos, días a la antesis y días a la maduración, así como los indicadores de bondad de ajuste del modelo. Los rendimientos del grano predichos estuvieron de acuerdo con los observados con $RMSE$ = 97,66 kg ha^{-1} y d = 0,98. Similar comportamiento tuvieron los valores de los días a la antesis y los días a la maduración con $RMSE$ = 5,32 días y 6,2 días respectivamente, con d = 0,66 y 0,87 respectivamente. Es válido resaltar que aunque d se encuentre por debajo de 0,9 hay autores que consideran estos valores como satisfactorios (Lamsal *et al*., 2013; Hernández *et al*., 2016). Para la masa de 1000 granos el $RMSE$ = 0 g y d se muestra sin valor a pesar de la exactitud de la simulaciones; esto es provocado cuando Si, Oi y $\overline{Ob}$ son iguales (Willmott *et al*., 2011). En todos los casos evaluados el $RMSEn$ se comportó con valores inferiores al 10 %, lo que evidencia la excelencia de las simulaciones realizadas por el modelo.

Hernández *et al*. (2016) reportaron un valor mayor de $RMSE$ (305,2 kg ha^{-1}), comparado con el obtenido en esta investigación, para el rendimiento de la variedad de arroz LP-5 en la localidad de Los Palacios, Cuba. En el noroeste de la India (Timsina *et al*., 1995), el $RMSE$ absoluto, tanto para la antesis como para la madurez, fue de 6 días y el índice d fue de 0,72 y 0,96 para las fechas de la antesis y la madurez, respectivamente, lo que concuerda con los resultados de esta investigación. Alocilja *et al*. (1991) también plantearon la ocurrencia de un buen ajuste entre las fechas de antesis y maduración observadas y predichas por el modelo con un $RMSEn$ de 4 y 3 % y d igual a 0,65 y 0,87 respectivamente para tres variedades de arroz en Filipinas.

Tabla 15: Indicadores de bondad de ajuste para el rendimiento, masa de 1000 granos, días a la antesis y días a la maduración fisiológica.

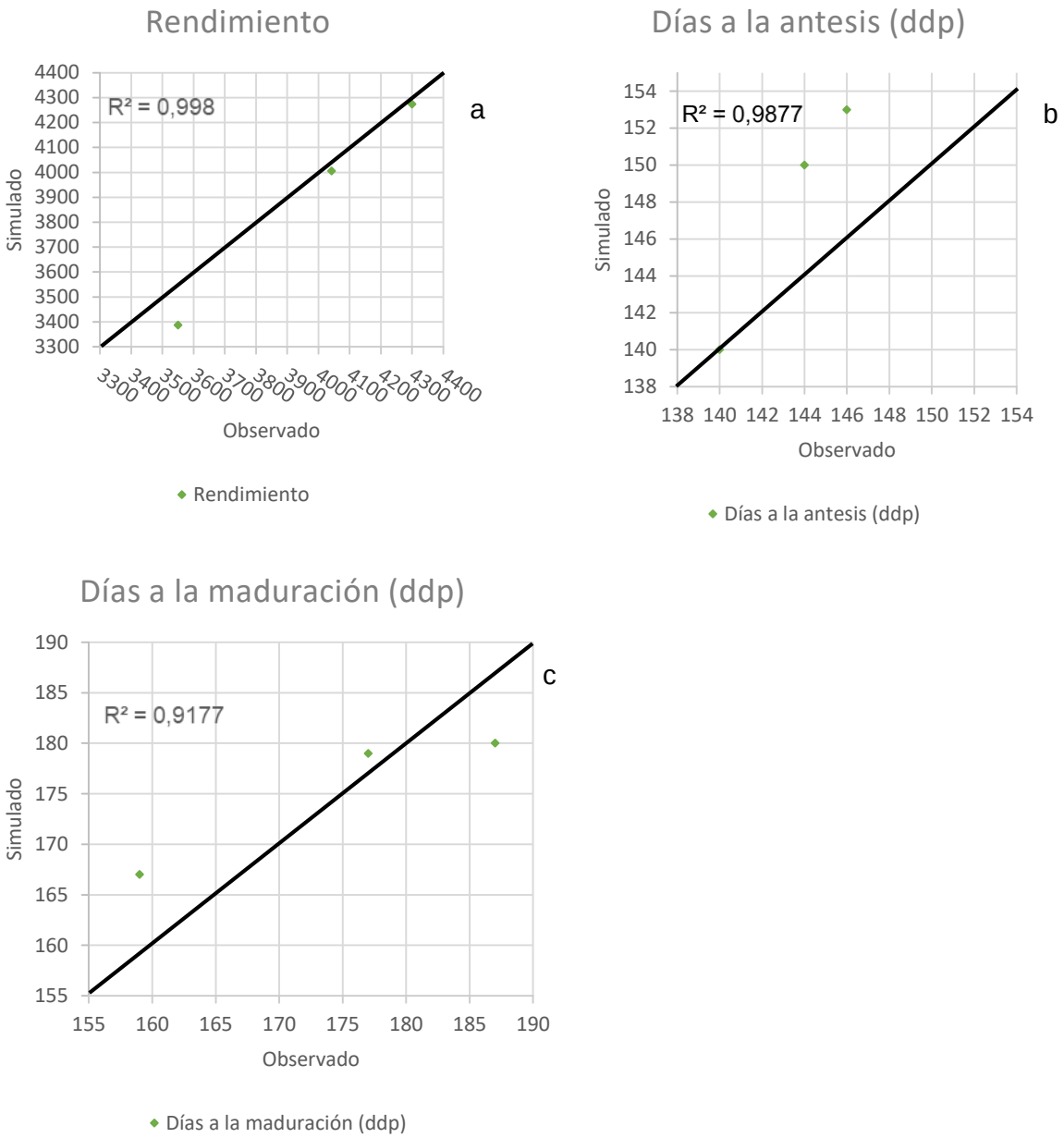
	Rendimiento (kg ha^{-1})		**Masa de 1000 granos (g)**		**Días a la antesis (ddp)**		**Días a la maduración (ddp)**	
Experimento	Oi	Si	Oi	Si	Oi	Si	Oi	Si
Enero 2004	3550	3387	25,0	25,0	140	140	159	167
Diciembre 2004	4300	4274	25,0	25,0	144	150	177	179
Febrero 2005	4042	4005	25,0	25,0	146	153	187	180
$\boldsymbol{RMSE}$		97,663		0		5,323		6,245
$\boldsymbol{RMSEn}$ **(%)**		2,46		0		3,71		3,58
d		0,98		-		0,66		0,871

Si valores simulados y Oi – valores observados

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5 se muestra el comportamiento de los valores observados y simulados en la recta (1:1) y el coeficiente de determinación (R^2). Se puede apreciar que los modelos son de buen ajuste pues R^2 > 90 % en todos los casos, lo que igualmente ratifica que los valores predichos son muy similares a los observados.

De manera general, el modelo subestimó el rendimiento medio obtenido y sobreestimó los valores observados para días a la antesis y días a la maduración. Estas diferencias en las estimaciones promedio de los parámetros estudiados son bastante pequeñas y también respaldan las buenas métricas estadísticas presentadas en este estudio.



ddp: días después de plantados

Figura 5: Comportamiento de los valores observados y simulados para rendimiento (a), días a la antesis (b) y días a la maduración (c)

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, los resultados de este estudio sugieren que el modelo DSSAT puede usarse para calcular los coeficientes genéticos con un grado considerable de precisión

para modelar el rendimiento de la variedad de arroz J-104, en la época poco lluviosa, y sus componentes fisiológicos en Cuba.

3.2. Simulación

En la Figura 6 se muestra el comportamiento del rendimiento del arroz variedad J-104 para las seis dosis de nitrógeno utilizadas en las simulaciones. El mayor valor de rendimiento se obtuvo para la dosis de 200 kg ha^{-1} de nitrógeno con 6363 kg ha^{-1}, logrando una eficiencia de 31,8 kg de arroz por kg de nitrógeno aplicado. Este rendimiento fue superior en 1627 kg ha^{-1} a la variante de 150 kg ha^{-1} de nitrógeno, que alcanzó el rendimiento más bajo.

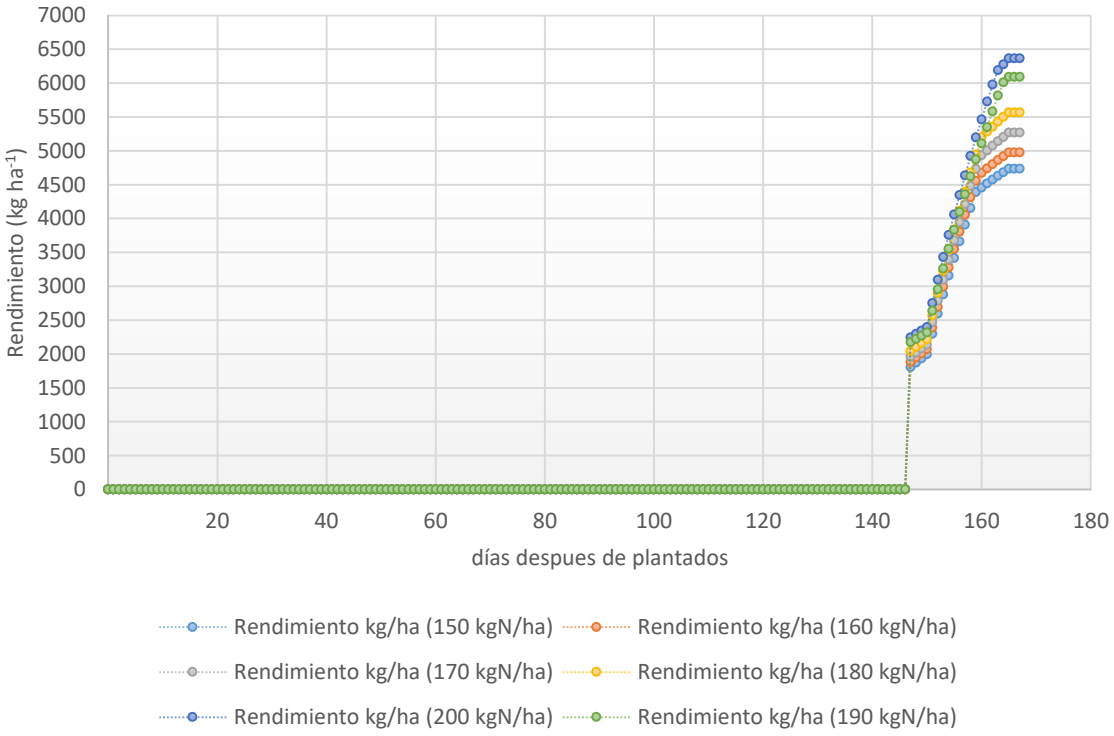


Figura 6: Rendimiento simulado para las distintas dosis de nitrógeno
Fuente: Elaboración propia

Los estudios realizados por Peña *et al*. (2001) demuestran que el nivel de nitrógeno influye de manera significativa sobre el rendimiento agrícola y sus componentes, ya que las variedades IACuba28 y J-104 manifestaron la mayor respuesta con el máximo

nivel aplicado, 140 y 180 kg ha^{-1} de nitrógeno en las campañas húmeda y seca, respectivamente. De igual forma, Maskina *et al*. (1987), al estudiar dosis desde 90 hasta 150 kg ha^{-1} de nitrógeno en tres variedades de arroz, observaron que todas ellas respondieron a la máxima dosis aplicada, con incrementos significativos en el rendimiento, número de panículas por planta y granos llenos por panícula. Por su parte, Guzmán *et al*. (2017) encontraron una dosis óptima de 225 kg ha^{-1} de nitrógeno al ajustar un modelo cuadrático y variando las dosis de 0 hasta 300 kg ha^{-1} de nitrógeno.

3.3. Análisis económico

En la Figura 7 se observa que todos los tratamientos generan ganancias. Estos ingresos oscilan entre $ 32341,01 ha^{-1} y $ 43900,02 ha^{-1} para los diferentes tratamientos. En la medida que aumentan los rendimientos obtenidos en la simulación también aumentan los ingresos. Por tanto, el mayor rendimiento monetario se obtiene para la dosis de 200 kg ha^{-1} de nitrógeno.

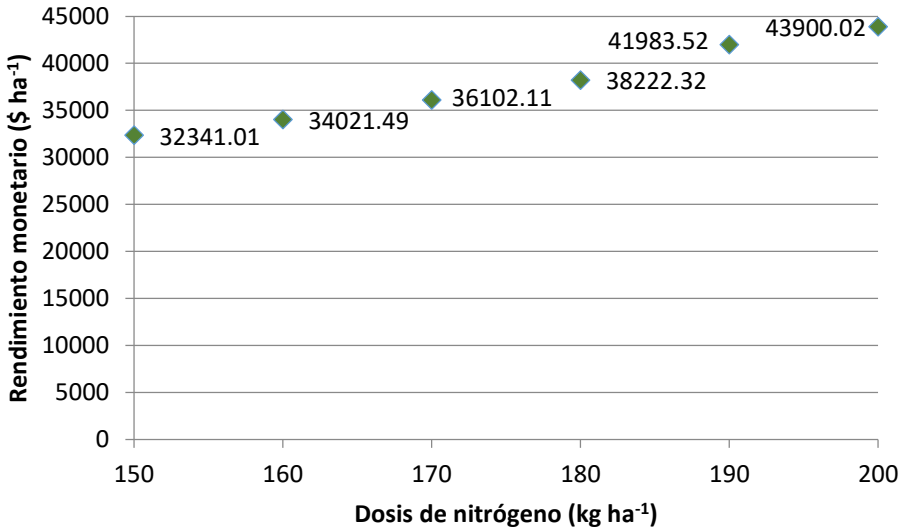


Figura 7: Rendimiento monetario alcanzado para las distintas dosis de nitrógeno
Fuente: Elaboración propia

Se debe recordar que en este análisis no se tuvieron en cuenta una gran cantidad de costos; la consideración de los mismos pudiera hacer que se obtuvieran menos

ingresos. No obstante este análisis constituye una aproximación a los ingresos que se pueden esperar al utilizar diferentes dosis de nitrógeno. Para obtener mayor rendimiento monetario se recomienda utilizar la dosis de 200 kg ha^{-1} de nitrógeno.

Con relación a lo antes expuesto es bueno destacar que aunque la mayor ganancia se genera con la dosis de 200 kg ha^{-1} de nitrógeno, en esta tesis se propone utilizar 190 kg ha^{-1} de nitrógeno que aporta una ganancia de $ 41983,52 ha^{-1}, ya que desde el punto de vista ecológico el nitrógeno es uno de los cinco principales agentes de cambio ambiental que, a nivel global, provocan una pérdida sistemática de la biodiversidad y de una gran cantidad de interacciones ecológicas que aseguran el buen funcionamiento de los ecosistemas.

CONCLUSIONES

1. La obtención de los coeficientes genéticos de la variedad de arroz J-104 permitió establecer que el modelo DSSAT puede usarse para modelar el rendimiento del arroz y sus componentes fisiológicos en las condiciones de Cuba.

2. El modelo es capaz de describir adecuadamente la dependencia de los rendimientos con el nivel de nitrógeno aplicado; obteniéndose el mayor rendimiento al utilizar la dosis de 200 kg ha^{-1} de nitrógeno

3. Aunque la dosis de 200 kg ha^{-1} de nitrógeno genera el mayor rendimiento económico, desde el punto de vista agroecológico se propone utilizar la dosis de 190 kg ha^{-1} de nitrógeno generando una ganancia de $ 41983,52 ha^{-1}.

RECOMENDACIONES

1. Realizar los experimentos de campo para validar los resultados del modelo y posteriormente realizar simulaciones bajo otras condiciones de manejo del cultivo.

2. Realizar calibraciones de otras variedades de arroz para obtener tendencias del cultivo en general.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abou El-Enin, M.M., Abo-Remaila, S.I., Mahmoud, A.S., 2016. Application and Evaluation of DSSAT V.4.6.1 Program for Simulation of Wheat and Soybean yields in Egypt. J. Basic Environ. Sci. 3, 85–97.

Acevedo, M.A., Castrillo, W.A., Belmonte, U.C., 2006. Origen, evolución y diversidad del arroz. Agron. Trop. 56, 151–170.

Akinbile, C.O., Sangodoyin, A.Y., 2010. Estimating crop coefficient model for upland rice (NERICA) under sprinkler irrigation system. Afr. J. Agric. Res. 5, 436–441.

Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrig. Drain. Pap. No 56 327.

Alocilja, E.C., Ritchie, J.T., Hodges, T., 1991. A model for the phenology of rice, in: Predicting Crop Phenology. CRC Press, pp. 181–189.

Amador, M., Peña, R., 1986. Tamaño óptimo de muestra para evaluar rendimiento y sus parámetros en el cultivo del arroz en la Estación Experimental de Jucarito. Cienc. Téc. En Agric. Arroz 5, 41–62.

Angladette, A., 1969. El arroz, técnicas agrícolas y producciones tropicales. Blume Esp. 221–232.

Anwar, M.R., Liu, D.L., Farquharson, R., Macadam, I., Abadi, A., Finlayson, J., Wang, B., Ramilan, T., 2015. Climate change impacts on phenology and yields of five broadacre crops at four climatologically distinct locations in Australia. Agric. Syst. 132, 133–144. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.09.010

Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rötter, R.P., Lobell, D.B., Cammarano, D., Kimball, B.A., Ottman, M.J., Wall, G.W., White, J.W., Reynolds, M.P., Alderman, P.D., Prasad, P.V.V., Aggarwal, P.K., Anothai, J., Basso, B., Biernath, C., Challinor, A.J., De Sanctis, G., Doltra, J., Fereres, E., Garcia-Vila, M., Gayler, S., Hoogenboom, G., Hunt, L.A., Izaurralde, R.C., Jabloun, M., Jones, C.D., Kersebaum, K.C., Koehler, A.-K., Müller, C., Naresh Kumar, S., Nendel, C., O'Leary, G., Olesen, J.E., Palosuo, T., Priesack, E., Eyshi Rezaei, E., Ruane, A.C., Semenov, M.A., Shcherbak, I., Stöckle, C., Stratonovitch, P., Streck, T., Supit, I., Tao, F., Thorburn, P.J., Waha, K., Wang, E., Wallach, D., Wolf, J., Zhao, Z., Zhu, Y., 2015a. Rising temperatures reduce global wheat production. Nat. Clim. Change 5, 143.

Asseng, Senthold, Zhu, Y., Wang, E., Zhang, W., 2015b. Crop modeling for climate change impact and adaptation, in: Crop Physiology. Elsevier, pp. 505–546. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417104-6.00020-0

Barrett, J.R., Nearing, M.A., 1998. Humanization of decision support using information from simulations. Agric. Syst. Model. Simul. 1–17.

Benítez, H.L., Miranda, I., 2018. Desarrollo y aplicación de los modelos de simulación para el estudio de la dinámica de poblaciones. Rev. Protección Veg. 33, 9.

Bouman, B.A.M., 2001. ORYZA2000: modeling lowland rice. IRRI.

Briceño, I., Álvarez, L.E., 2010. Evaluación de un sistema de preparación del suelo y siembra en el cultivo de arroz (Oryza sativa L.). Rev. Unellez Cienc. Tecnol. 28, 16–24.

Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N.,

Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J.-M., Meynard, J.M., Delécolle, R., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. Agronomie 18, 311–346. https://doi.org/10.1051/agro:19980501

Choudhury, A.K., Ishtiaque, S., Sen, R., Hossain, M.B., Miah, M.M., Rahman, M.M., Zahan, T., Kalra, N., 2018. Calibration and Validation of DSSAT Model for Simulating Wheat Yield in Bangladesh. Available Online Httpscholarsmepubcom 356 Haya Saudi J. Life Sci. 3, 356–364.

CIAT, 1985. Investigación y producción de arroz. Crecimiento y etapas de desarrollo de la planta de arroz. CIAT, Colombia.

Corbeels, M., Chirat, G., Messad, S., Thierfelder, C., 2016. Performance and sensitivity of the DSSAT crop growth model in simulating maize yield under conservation agriculture. Eur. J. Agron. 76, 41–53. https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.02.001

Cordero, V., 2013. Situación de la producción arrocera a nivel mundial y en Cuba.

Cristo, E., González, M.C., Cárdenas, R., Cabrera, A., 2006. Comportamiento de nuevos genotipos de arroz (Oryza sativa L.) obtenidos mediante cultivo de anteras para condiciones de bajo suministro de agua. Cultiv. Trop. 27, 57–62.

Cuevas, A., 1999. Manejo de la soca de arroz. St. Fé Bogotá-Colomb. Arroz 48, 16–18.

De Datta, S.K., 1981. Principles and practices of rice production. Int. Rice Res. Inst.

De Wit, C.T., 1986. Modelling Agricultural Production. Acta Hortic. 184, 59–70.

Degiovanni, V., Martínez, C., Motta, F., 2010. Producción eco-eficiente del arroz en América Latina. Tomo Cali-Colomb. Cent. Int. Agric. Trop. CIAT 35–59.

Deus, J., 1995. El diminuto grano sigue todavía un largo camino hacia la variedad perfecta. Rev. Cienc. Innov. Desarro. Inf. Científica Tecnológica 1, 6–8.

Dias, M.P.N.M., Navaratne, C.M., Weerasinghe, K.D.N., Hettiarachchi, R.H.A.N., 2016. Application of DSSAT Crop Simulation Model to Identify the Changes of Rice Growth and Yield in Nilwala River Basin for Mid-centuries under Changing Climatic Conditions. Procedia Food Sci. 6, 159–163. https://doi.org/10.1016/j.profoo.2016.02.039

Dong, C., Hu, D., Fu, Y., Wang, M., Liu, H., 2014. Analysis and optimization of the effect of light and nutrient solution on wheat growth and development using an inverse system model strategy. Comput. Electron. Agric. 109, 221–231. https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.10.013

FAO, 2018. Seguimiento del mercado del arroz de la FAO XXI, 10.

Feng, Q., Zhang, Y., Hao, P., Wang, S., Fu, G., Huang, Y., Li, Y., Zhu, J., Liu, Y., Hu, X., 2002. Sequence and analysis of rice chromosome 4. Nature 420, 316–320.

Franco, I., Ramírez, E., 2000. VARIACIÓN DE LAS FENOFASES DEL CULTIVO DEL ARROZ BAJO CONDICIONES DE ANIEGO EN FUNCIÓN DE EPOCA DE SIEMBRA. Rev. Cuba. Arroz 2, 35–40.

Gálvez, G., 2008. Modelación del crecimiento de las plantas. Modelación de cultivos agrícolas. Semin. Model. Cultiv. 2008 Mar 13-14.

Gálvez, G., Sigarroa, A., López, T., Fernández, J., 2010. Modelación de cultivos agrícolas. Algunos ejemplos. Cultiv. Trop. 31, 60–65.

González, C., Linares, O., 2008. Efecto de la Sesbania rostrata sobre el rendimiento agrícola de arroz de aniego, in: Resúmenes Del 4 Encuentro Internacional Del Arroz. La Habana, pp. 64–65.

Guevara, E., 2007. La simulación del desarrollo, crecimiento y rendimiento en maíz 37.

Guzmán, R., Vedia, A., Maquera, L., Baek, E.H., López, A., Vales, M., 2017. Respuesta del cultivo de Arroz de Secano (Oryza sativa L.) a diferentes niveles de fertilización nitrogenada, Municipio de Yapacani, departamento de Santa Cruz, verano 2015/16. Rev. Investig. Agropecu. For. Boliv. 1, 54–59.

Hernández, A., Pérez, J.M., Bosch, D., Castro, N., 2015. Clasificación de los Suelos de Cuba 2015. Ediciones INCA.

Hernández, N., Soto, F., Caballero, A., 2009. MODELOS DE SIMULACIÓN DE CULTIVOS. CARACTERÍSTICAS Y USOS. Cultiv. Trop. 30, 10.

Hernández, N., Soto, F., Florido, R., Plana, R., Caballero, A., Maqueira, L.A., Cid, G., López, T., Chaterlan, Y., García, A., Solano, O., Vázquez, R., Otero, L., Vantour, A., 2016. Utilización de un modelo de simulación para la predicción del comportamiento de algunos cereales en las condiciones de Cuba. Cultiv. Trop. 37, 7.

Hodges, T., Ritchie, J.T., 1991. The CERES-Wheat phenology model. Predict. Crop Phenol. 133–141.

Hunt, L.A., Jones, J.W., Ritchie, J.T., Teng, P.S., 1989. Genetic coefficients for the IBSNAT crop models, in: Proceedings of IBSNAT Symposium, 81st Ann. Meeting of Amer. Soc. Agronomy, Las Vegas. pp. 15–30.

IBM, 2007. SPSS. IBM.

Jones, C.A., Dyke, P.T., Williams, J.R., Kiniry, J.R., Benson, V.W., Griggs, R.H., 1991. EPIC: An operational model for evaluation of agricultural sustainability. Agric. Syst. 37, 341–350. https://doi.org/10.1016/0308-521X(91)90057-H

Jones, J., Hoogenboom, G., Porter, C., Boote, K., Batchelor, W., Hunt, L., Wilkens, P., Singh, U., Gijsman, A., Ritchie, J., 2003. The DSSAT cropping model. Eur. J. Agron. 18, 235–265.

Jones, P., Thornton, P., 2003. The potential impacts of climate change on maize production in Africa and Latin America in 2055. Glob. Environ. Change 13, 51–59. https://doi.org/10.1016/S0959-3780(02)00090-0

Kambayashi, M., Kainuma, E., Nemoto, Y., 1990. Changes in grain nitrogen content and ripening characteristics of rice (Oryza sativa L.) with fertilizer application after flowering under different soil moisture conditions. Bull. Yamagata Univ. Agric. Sci. Jpn.

Kato, Y., Kamoshita, A., Yamagishi, J., Imoto, H., Abe, J., 2007. Growth of Rice (Oryza Sativa L.) Cultivars Under Upland Conditions With Different Levels of Water Supply3. Root System Development, Soil Moisture Changeand Plant Water Status. Plant Prod. Sci. 10, 3–13. https://doi.org/10.1626/pps.10.3

Keating, B.., Carberry, P.., Hammer, G.., Probert, M.., Robertson, M.., Holzworth, D., Huth, N.., Hargreaves, J.N.., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J.., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K.., Asseng, S., Chapman, S., McCown, R.., Freebairn, D.., Smith, C.., 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. Eur. J. Agron. 18, 267–288. https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00108-9

Lamsal, A., Amgai, L.P., Giri, A., 2013. Modeling the sensitivity of CERES-Rice model: An experience of Nepal. Agron. J. Nepal 3, 11–22.
Lavecchia, A., 1991. Arroz: fertilización nitrogenada en la zona norte del país. INIA Ser. Téc.
Leyva, Y., Peña, L.R., Peña, R., 2008. INFLUENCIA DE LA DENSIDAD DE SIEMBRA Y EL NIVEL DE NITRÓGENO SOBRE ELRENDIMIENTO AGRÍCOLA DE LA VARIEDAD INCA LP-5. Rev. Cuba. Arroz 10, 6.
Link, E.J., 2005. Investigation and modeling of the optimization potential of adapted nitrogen fertilization strategies in corn cropping system with regard to minimize nitrogen losses (Tesis Doctoral). Institut fur Pflanzenbau und Grunland. Universitat Hohenheim.
López, T., González, F., García, A., Herrera, J., Cid, G., 2010. Adecuación de un modelo de simulación de cultivo para la predicción del crecimiento y producción del arroz en el sur de La Habana. Rev. Cienc. Téc. Agropecu. 19, 57–64.
Maqueira, L.A., Roján, O., Torres, K., Duque, D., 2018. DURACIÓN DE LAS FASES FENOLÓGICAS, SU INFLUENCIA EN EL RENDIMIENTO DEL ARROZ (Oryza sativa L.). Cultiv. Trop. 39, 68-.
Maqueira, L.A., Torres, W., Pérez, S.A., Roján, O., Morejón, R., 2016. Comportamiento del crecimiento y rendimiento agrícola de dos cultivares de sorgo (Sorghum bicolor L. Moench) en la época poco lluviosa en la localidad de Los Palacios. Cultiv. Trop. 37, 103–108. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1535.7682
Martín, M.M.-S., Olesen, J.E., Porter, J.R., 2014. A genotype, environment and management (GxExM) analysis of adaptation in winter wheat to climate change in Denmark. Agric. For. Meteorol. 187, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.11.009
Martinez-Eixarch, M., del Mar Català, M., Tomàs, N., Pla, E., Zhu, D., 2015. Tillering and yield formation of a temperate Japonica rice cultivar in a Mediterranean rice agrosystem. Span. J. Agric. Res. 13, 0905.
Maskina, M.S., Singh, Y., Singh, B., 1987. Response of new rice varieties to N. Intl Rice Res Newsl 12, 8–9.
Matsuo, T., Hoshikawa, K., 1993. Science of the rice plant. Food and Agriculture Policy Research Center Tokyo.
Meira, S., Guevara, E., 2000. Uso de modelos de simulación de cultivos como herramienta para la toma de decisiones en el cultivo de soja. Potash Phosphate Inst. Httpwww Ppi-Ppic Org.
Méndez, P., 2018. Precios mundiales del arroz con tendencias mixtas (No. 176).
Mercosur, 2019. Urea a granel [WWW Document]. Mercosur.com. URL https://www.mercosur.com/es/precio-de-urea.a.granel/ (accessed 2.13.19).
MINAG, 2001. Instructivo técnico cultivo de arroz. Instituto de Investigaciones del Arroz, La Habana.
MINAG, IIG, JICA, 2014. Instructivo técnico cultivo de arroz.
Mohanty, M., Probert, M.E., Reddy, K.S., Dalal, R.C., Mishra, A.K., Subba Rao, A., Singh, M., Menzies, N.W., 2012. Simulating soybean–wheat cropping system: APSIM model parameterization and validation. Agric. Ecosyst. Environ. 152, 68–78. https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.02.013

Morejón, R., Hernández, J.J., Díaz, S., 2005. Comportamiento de variedades comerciales de arroz (Oryza sativa L.) en cuatro granjas del complejo agroindustrial arrocero Los Palacios. Cultiv. Trop. 26, 77–81.

Morooka, M., Suzuki, Y., Kamekawa, K., 1993. Effect of nitrogen fertilizer application on yield and nutrient uptake of high-yielding rice varieties. Trans 14th Int Congr Soil Sci 4, 595–596.

Mukhtar, H., Lin, Y.-P., Shipin, O.V., Petway, J.R., 2017. Modeling Nitrogen Dynamics in a Waste Stabilization Pond System Using Flexible Modeling Environment with MCMC. Int. J. Environ. Res. Public. Health 14, 765. https://doi.org/10.3390/ijerph14070765

Murthy, V.R.K., 2011. Crop growth modeling and its applications in agricultural meteorology., in: Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology. pp. 235–261.

ONEI, 2017. CAPÍTULO 9: AGRICULTURA, GANADERÍA, SILVICULTURA Y PESCA, in: Anuario Estadístico de Cuba 2016. Cuba.

Panda, M., Rao, C.H.N., 1991. Influence of nitrogen on photosynthesis and productivity of rice in dry and wet seasons. Oryza 28, 37–40.

Paneque, V.M., 2010. Manual de técnicas analíticas para análisis de suelo, foliar, abonos orgánicos y fertilizantes químicos. Ediciones INCA.

Peña, L.R., Avila, J., Peña, R., 2001. EFECTO DE LA DENSIDAD DE SIEMBRA Y LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA SOBRE EL RENDIMIENTO AGRÍCOLA Y SUS COMPONENTES EN LAS VARIEDADES DE ARROZ IACuba 28 Y J-104. Rev. Cuba. Arroz 3, 38–47.

Peña, L.R., Duany, A., Avila, J., Peña, R., 2004a. DENSIDAD DE SIEMBRA Y FERTILIZACIÓN NITROGENADA ÓPTIMAS PARA LA VARIEDAD DE ARROZ REFORMA EN LA ÉPOCA DE SECA. Rev. Cuba. Arroz 6, 30–36.

Peña, L.R., Duany, A., Avila, J., Peña, R., 2004b. DENSIDAD DE SIEMBRA Y FERTILIZACIÓN NITROGENADA ÓPTIMAS PARA LA VARIEDAD DE ARROZ IACuba 27 EN LA ÉPOCA DE SECA. Rev. Cuba. Arroz 6, 37–43.

Polón, R., Castro, R., 1999. Aplicación del estrés hídrico como una alternativa para incrementar el rendimiento en el cultivo del arroz (Oryza sativa L.). Cultiv. Trop. 20, 37–39.

Polón, R., Castro, R., Ruiz, M., Maqueira, L.A., 2012. PRÁCTICA DE DIFERENTES ALTURAS DE CORTE EN EL REBROTE Y SU INFLUENCIA EN EL RENDIMIENTO DEL ARROZ (Oryza sativa L.) EN UNA VARIEDAD DE CICLO MEDIO. Cultiv. Trop. 33, 4.

Polón, R., Castro, R.I., Pérez, N., Cristo, E., Morejón, R., 2003. INFLUENCIA DE LA ALTURA DE LA SOCA EN EL RENDIMIENTO DEL ARROZ (Oryza sativa L.) EN UNA VARIEDAD DE CICLO CORTO. Cultiv. Trop. 24, 55–57.

Polón, R., Castro, R.I., Pérez, N., Morejón, R., Ramírez, M.A., Miranda, A., Rodríguez, A.T., 2006. INFLUENCIA DE LA ALTURA DE LA SOCA EN EL RENDIMIENTO DEL ARROZ (Oryza sativa L.) EN UNA VARIEDAD DE CICLO MEDIO (J-104). Cultiv. Trop. 27, 53–55.

Puldón, V., Enrique, S., Alfonso, R., Gómez, P., Pérez, R., Montalvo, L., Pachón, H., Pompilio, C.Z., 2011a. Evaluación sensorial de la variedad de arroz IACuba 30

con mayor valor nutricional. Presented at the 5 Encuentro Internacional del Arroz, La Habana, pp. 52–61.
Puldón, V., Gómez, P.J., Suárez, D., Suárez, E., Pérez, L., 2001. Catálogo de variedades de arroz de Cuba. Instituto de Investigaciones de Granos, Cuba.
Puldón, V., Gómez, P.J., Suárez, E., Martínez, C., Rodríguez, S., Suárez, D., Limia, J., Pérez, R., Hernández, R., Pachón, H., Padrón, M., Valdés, L., 2011b. Agrosalud en cuba: una asociación agrícola y de salud, in: Resúmenes Del 5 Encuentro Internacional Del Arroz. La Habana.
Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T., Fereres, E., 2018. Chapter 2. Users Guide, in: Reference Manual of Aquacrop Model. FAO.
Rafey, A., Khan, P.A., Srivastava, V.C., 1989. EFFECT OF N ON GROWTH, YIELD AND NUTRIENT-UPTAKE OF UPLAND RICE. INDIAN SOC AGRONOMY INDIAN AGR RES INST DIV AGRONOMY, NEW DELHI 110012, INDIA.
Ray, M., Roul, P.K., Baliarsingh, A., 2018. Application of DSSAT Crop Simulation Model to Estimate Rice Yield in Keonjhar District of Odisha (India) under Changing Climatic Conditions. Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci. 7, 659–667. https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.704.075
Reynolds, M., Quilligan, E., Aggarwal, P., Bansal, K., Cavalieri, A., Chapman, S., Chapotin, S., Datta, S., Duveiller, E., Gill, K., Jagadish, K., Joshi, A., Koehler, A., Kosina, P., Krishnan, S., Lafitte, R., Mahala, R., Muthurajan, R., Paterson, A., Prasanna, B., Rakshit, S., Rosegrant, M., Sharma, I., Singh, R., Sivasankar, S., Vadez, V., Valluru, R., Vara, P., Prakash, O., 2016. An integrated approach to maintaining cereal productivity under climate change. Glob. Food Secur. 8, 9–18.
Ritchie, J.T., Alocilja, E.C., Singh, U., Uehara, G., 1986. IBSNAT and the CERES-rice model. Presented at the Weather and Rice: Proceedings of the International Workshop on the Impact of Weather Parameters on Growth and Yield of Rice, International Rice Research Institute, Manila, Philippines, pp. 271–281.
Ritchie, J.T., Singh, U., Godwin, D., Hunt, L., 1989. A user's guide to CERES-Maize V2. 10. Int. Fertil. Dev. Cent. Muscle Shoals AL.
Rodríguez, O., Florido, R., Varela, M., 2018. APLICACIONES DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA Y LA SIMULACIÓN DE CULTIVOS AGRÍCOLAS EN CUBA. Cultiv. Trop. 39, 7.
Rodríguez, W., Flores, V., 2006. Comportamiento fenológico de tres variedades de rosas rojas en función de la acumulación de la temperatura. Agron. Colomb. 24, 247–257.
Saikia, M., Dutta, T.C., 1995. Effect of water regimes and nitrogen on yield and uptake of nitrogen in transplanted rice. Indian J. Agron. 34, 35–39.
Sánchez, A., Maqueira, L.A., Torres, W., Pozo, Á.L., Torres, K., 2016. Comportamiento del crecimiento de dos cultivares de arroz en diferentes fechas de siembra y su influencia en el rendimiento. Avances 16, 306–316.
Sarvestani, Z.T., Pirdashti, H., Sanavy, S., Balouchi, H., 2008. Study of water stress effects in different growth stages on yield and yield components of different rice (Oryza sativa L.) cultivars. Pak. J. Biol. Sci. 11, 1303–1309.
Satapathy, S.S., Swain, D.K., Herath, S., 2014. Field experiments and simulation to evaluate rice cultivar adaptation to elevated carbon dioxide and temperature in

sub-tropical India. Eur. J. Agron. 54, 21–33. https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.11.010
Shaw, C., 2005. La incógnita Newton. Roca Editorial de Libros.
Singh, G., Singh, O.P., 1990. Effect of coated urea on yield, N uptake, recovery, and response of rice and succeeding wheat crop. Int. Rice Res. Newsl. 15.
Singh, U., Godwin, D.C., Ritchie, J.T., 1988. Modeling growth and Development of rice under upland lowland conditions. Agron. Abs 80, 27.
Singh, U., Ritchie, J.T., Godwin, D.C., 1993. A User's Guide to CERES Rice, V2. 10. International Fertilizer Development Center Muscle Schoals.
Stöckle, C.O., Donatelli, M., Nelson, R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. Eur. J. Agron. 18, 289–307. https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00109-0
Suárez, E., Deus, J., Fuentes, J.L., Duany, A., 2002. Avances y perspectivas de programa de mejoramiento genético del arroz en Cuba. Presented at the Encuentro Internacional del Arroz, La Habana, p. 74.
Timsina, J., Singh, U., Singh, Y., Lansigan, F.P., 1995. Addressing sustainability of rice-wheat systems: testing and applications of CERES and SUCROS model. Presented at the Proceedings of the International Rice Research Conference, LOS BAÑOS, LAGUNA, PHILIPPINES.
Tivy, J., 2014. Agricultural ecology. Routledge.
Torres, V., Ortíz, J., 2005. Aplicaciones de la modelación y simulación a la producción y alimentación de animales de granjas. Rev. Cuba. Cienc. Agríc. 39, 397–406.
Torres, V., Ortíz, J., Crespo, G., Rodríguez, I., Medero, R., 2002. SIMULACIÓN DEL BALANCE ANUAL EN SISTEMAS DE PASTOREO BOVINO. Rev. Ing. Ind. 1, 27–32.
Tuero, L., Díaz, J., García, J., Gómez, S., 2018. Valoración de estrategias de riego para el cultivo de la soya usando el modelo DSSAT-CROPGRO. Rev. C Iencias Téc. Agropecu. 27.
Villegas, J.R., González, V.A., Salazar, J.A.C., 2004. MODELOS EMPÍRICOS DEL CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE TOMATE PODADO A TRES RACIMOS. Rev. Fitotec. Mex. 27, 63–67.
Wadsworth, J., 1997. Análisis de sistemas de producción animal. FAO, Roma.
Willmott, C., 1982. Some comments on the evaluation of model performance. Bull. Am. Meteorol. Soc. 63, 1309–1313.
Willmott, C.J., Robeson, S.M., Matsuura, K., 2011. A refined index of model performance. Int. J. Climatol. 32, 2088–2094. https://doi.org/10.1002/joc.2419
Won, J.G., Yoshida, T., Uchimura, Y., 2002. Genetic effect on amylose and protein contents in the crossed rice seeds. Plant Prod. Sci. 5, 17–21.
Yamagata, H., 1999. Analysis of morphological factors. Sci. Plant Genet. Tokyo Food Agric. Policy Res. Cent. 227–285.
Yoshida, Shou., Forno, D.A., Cock, J.H., Gomez, K.A., 1976. Laboratory Manual For Physiological Studies Of Rice, THIRD EDITION. ed. LOS BAÑOS, LAGUNA, PHILIPPINES.
Zuo, J., Li, J., 2014. Molecular dissection of complex agronomic traits of rice: a team effort by Chinese scientists in recent years. Natl. Sci. Rev. 1, 253–276. https://doi.org/10.1093/nsr/nwt004

ANEXOS

Anexo 1: Fichero X.

*EXP.DETAILS: INLP0401RI UCTB LP RICE ENERO 2004

*GENERAL
@PEOPLE
-99
@ADDRESS
UCTB LP
@SITE
Pinar del Rio

*TREATMENTS -------------FACTOR LEVELS------------
@N R O C TNAME..... CU FL SA IC MP MI MF MR MC MT ME MH SM
4 1 1 0 J-104 4 1 0 0 4 1 1 0 0 0 0 0 1

*CULTIVARS
@C CR INGENO CNAME
4 RI IB0036 J-104

*FIELDS
@L ID_FIELD WSTA.... FLSA FLOB FLDT FLDD FLDS FLST SLTX SLDP ID_SOIL FLNAME
1 INTP0401 PRSD0401 -99 -99 -99 -99 -99 -99 -99 -99 PRLP110017 Fields

*INITIAL CONDITIONS
@C PCR ICDAT ICRT ICND ICRN ICRE ICWD ICRES ICREN ICREP ICRIP ICRID ICNAME
1 RI 00001 -99 -99 1 1 -99 -99 -99 -99 -99 -99 -99
@C ICBL SH2O SNH4 SNO3
1 15 .283 .2 1.6
1 30 .297 .2 1.6
1 50 .29 .2 1.6
1 70 .324 .2 1.6
1 100 .333 .2 1.6

*PLANTING DETAILS
@P PDATE EDATE PPOP PPOE PLME PLDS PLRS PLRD PLDP PLWT PAGE PENV PLPH SPRL PLNAME
4 04015 04026 280 203 S U 15 0 2 -99 -99 -99 -99 -99 J-104

*IRRIGATION AND WATER MANAGEMENT
@I EFIR IDEP ITHR IEPT IOFF IAME IAMT IRNAME
1 1 30 50 100 GS000 IR001 10 Riego
@I IDATE IROP IRVAL
1 04015 IR007 100

*FERTILIZERS (INORGANIC)
@F FDATE FMCD FACD FDEP FAMN FAMP FAMK FAMC FAMO FOCD FERNAME
1 04015 FE016 AP001 5 0 0 60 -99 -99 -99 Fertilizer
1 04015 FE014 AP001 5 0 60 0 -99 -99 -99 Fertilizer
1 04033 FE005 AP001 5 25 0 0 -99 -99 -99 Fertilizer
1 04057 FE005 AP001 5 25 0 0 -99 -99 -99 Fertilizer
1 04085 FE005 AP001 5 25 0 0 -99 -99 -99 Fertilizer
1 04112 FE005 AP001 5 25 0 0 -99 -99 -99 Fertilizer

*SIMULATION CONTROLS
@N GENERAL NYERS NREPS START SDATE RSEED SNAME..... SMODEL
1 GE 1 30 S 04015 2150 DEFAULT SIMULATION CONTR
@N OPTIONS WATER NITRO SYMBI PHOSP POTAS DISES CHEM TILL CO2
1 OP Y Y N N N N N N M

Anexo 2: Fichero A.

*EXP.DATA (A): IRLP0412, Los Palacios

! File last edited on day 11/01/2018 at 3:53:33 PM
!

@TRNO	HWAM	HWUM	H#AM	H#UM	LAIX	CWAM	BWAH	ADAT	MDAT	GN%M	CNAM	SNAM	GNAM
1	5332	0.027	34450	424	5.25	2132	-99	101	133	-99	-99	-99	-99
2	5246	0.025	36088	374	4.71	11043	-99	101	128	-99	-99	-99	-99
3	4988	0.024	43050	450	3.19	13022	-99	104	137	-99	-99	-99	-99
4	4300	0.025	33792	384	2.66	11826	-99	116	149	-99	-99	-99	-99

Anexo 3: Fichero T.

*EXP.DATA (T): diciembre del 2004

! File last edited on day 11/01/2018 at 3:51:27 PM
!
!

@TRNO	DATE	T#AD	LAID	RWAD	SWAD	GWAD	LWAD	CWAD
1	04348	-99	5.3	-99	-99	5332	-99	1135.7
2	04348	-99	4.7	-99	-99	5246	-99	1107.7
3	04348	-99	3.2	-99	-99	4988	-99	1305.1
4	04348	-99	2.7	-99	-99	4300	-99	1210.8

Anexo 4: Fichero de coeficientes genéticos

*RICE GENOTYPE COEFFICIENTS: RICER046 MODEL

!v4.6.0.14

@VAR#	VAR-NAME.....	EXPNO	ECO#	P1	P2R	P5	P2O	G1	G2	G3	G4	PHINT
IB0036	J-104	3,3	IB0001	600.0	200.4	350.5	10.00	45.11	0.025	1.00	1.129	83.00