

Revisión bibliográfica MODELOS DE SIMULACIÓN DE CULTIVOS. CARACTERÍSTICAS Y USOS

Naivy Hernández✉, F. Soto y A. Caballero

ABSTRACT. Simulation models constitute a fundamental tool to understand the complexity characterizing ecological and environmental systems, since they are the only one available to translate a hypothesis collection about ecological processes when representing how the ecosystem fully works. They enable to analyze technological, economic and environmental impacts, evaluate productive strategies and predict crop yield. They are generally approached to a better understanding of problems and to know the reality investigated in advance. A good model is able to reveal interactions among different components which were not evident when each process was studied separately, also it will allow performing trials that could not be carried out in the real system. This research work deals with the characteristics and use of simulation models, some of the main classifications and examples of studies conducted with these models in Cuba, as well as the peculiar traits of DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) model. Therefore, this review is intended to present the characteristics and significance of crop simulation models, as an essential tool in the decision-taking processes, to be further applied as a first approach of the productive capacity under different edaphoclimatic conditions of Cuba, as well as to search on certain plant processes, that will need a better interpretation of its interaction against other productive, input and environmental factors.

Key words: simulation models, crops

RESUMEN. Los modelos de simulación constituyen una herramienta fundamental para entender la complejidad que caracteriza los sistemas ecológicos y ambientales. Esto se debe a que son la única herramienta disponible para traducir una colección de hipótesis acerca de procesos ecológicos en una representación de cómo el ecosistema funciona en su totalidad. Estos permiten realizar análisis de impactos tecnológicos, económicos y ambientales, la evaluación de estrategias productivas y los pronósticos del rendimiento de los cultivos. Su empleo se enfoca generalmente a comprender mejor los problemas y anticipar la realidad que se investiga. Un buen modelo es capaz de revelar interacciones entre los diferentes componentes que no eran evidentes al estudiar cada uno de los procesos separadamente y permitirá ensayar experimentos que no se podrían realizar en el sistema real. En este trabajo se abordan las características y utilización de los modelos de simulación, algunas de las principales clasificaciones y ejemplos de trabajos realizados en Cuba con estos modelos, así como las peculiaridades del modelo *DSSAT* (sistema de apoyo para las decisiones de transferencia agrotecnológica). Por tanto, esta revisión pretende dar a conocer las características e importancia de los modelos de simulación de cultivos, como herramienta principal en los procesos de toma de decisiones, para poder lograr posteriores aplicaciones como primera aproximación de la capacidad productiva en distintas condiciones edafoclimáticas de Cuba, así como también lograr la investigación de ciertos procesos en plantas, que necesitarán una mejor interpretación en su interacción frente a otros factores productivos, de insumos y ambientales.

Palabras clave: modelos de simulación, cultivos

INTRODUCCIÓN

Los esfuerzos científicos para cubrir la creciente demanda de alimentos de 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 (1).

Un método que incrementa la comprensión de los conceptos básicos y que al mismo tiempo organiza este conocimiento dentro de un marco dinámico y cuantitativo, es comúnmente conocido como Análisis de Sistemas o Investigación de Sistemas (*System Analysis* o *System Research*).

Una parte de esta metodología, la cual es consecuencia de los avances tecnológicos de la computación y la ciencia de la informática, son las herramientas de apoyo para la integración del conocimiento adquirido en el ámbito disciplinario. Estas herramientas incluyen los modelos de simulación del crecimiento de las plantas y los procesos del suelo, los modelos de sistemas sociales y económicos, los Sistemas de Información Geográfica (SIG), y los sistemas de manejo de base de datos (1).

Naivy Hernández, Reserva Científica y Dr.C. F. Soto, Investigador Titular del departamento de Fitotecnia; Dr.C. A. Caballero, Investigador Titular del departamento de Matemática Aplicada, Instituto nacional de Ciencias Agrícolas, gaveta postal 1, San José de las Lajas, La Habana, Cuba, CP 32 700.

✉ naivy@inca.edu.cu

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. La simulación es una de las herramientas más importantes y más interdisciplinarias (2); los modelos de simulación de cultivos 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 (3); durante tres décadas esos modelos se han aplicado, en lo fundamental, en países de clima templado por los beneficios que aportan.

En los países altamente desarrollados la simulación es una herramienta principal en los procesos de toma de decisiones, el manejo de empresas y la planeación de la producción. Además, la simulación es cada vez más "amigable" para el usuario, que no tiene que ser un especialista en computación. Sin embargo, a pesar de que los científicos en diversas áreas como la biología, la agricultura y la economía, entre otros, han estado construyendo modelos de simulación por ya más de 30 años, la aceptación de estos dentro del flujo de la investigación científica fue muy lento hasta hace poco más de una década (4). Consultando varias referencias en Internet que analizan bibliografía sobre el tema en artículos de revistas, se encontró que los índices de las publicaciones relacionadas con modelos evolucionaron de 82 anuales en la década del 70 hasta cerca de 270 anuales en la década del 90. El nombre de programas (*software*) se mencionó en el título o resumen de solo 11 artículos entre 1973 y 1988, mientras que para el período de 1989 a 1998, el número correspondiente fue de 77. En Cuba no existen muchos trabajos donde se utilice la modelación (5).

Es por ello que el objetivo de este trabajo es dar a conocer las características e importancia de los modelos de simulación de cultivos, como herramienta principal en los procesos de toma de decisiones, para poder lograr posteriores aplicaciones de estos modelos como primera aproximación de la capacidad productiva en distintas condiciones edafoclimáticas de Cuba, así como también lograr la investigación de ciertos procesos en plantas que necesitarán una mejor interpretación en su interacción, frente a otros factores productivos, de insumos y ambientales.

DEFINICIÓN DE MODELO

Un modelo es un bosquejo que representa un conjunto 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. Los modelos son muy útiles para describir, explicar o comprender mejor la realidad, cuando es imposible trabajar directamente en la realidad en sí (6).

Un modelo es una representación simplificada de un sistema y un sistema es una parte bien delimitada del mundo real. Por ejemplo, un cultivo con todos sus órganos (raíz, tallo, hojas), procesos y mecanismos (crecimiento, desarrollo, fotosíntesis, transpiración, etc.) constituyen un sistema (7).

La construcción de un modelo consiste en la individualización de una serie de ecuaciones matemáticas, mediante las cuales es posible reproducir del modelo más fiel posible, el comportamiento del sistema examinado (7).

El uso de modelos, a veces llamado "modelación", es un instrumento muy común en el estudio de sistemas de toda índole. Los modelos son especialmente importantes, porque ayudan a comprender el funcionamiento de los sistemas. El empleo de modelos facilita el estudio de los sistemas, aun cuando estos puedan contener muchos componentes y mostrar numerosas interacciones,

como puede ocurrir si se trata de conjuntos bastante complejos y de gran tamaño. El trabajo de modelación constituye una actividad técnica como cualquiera otra, y dicha labor puede ser sencilla o compleja, según el tipo de problema específico que deba analizarse (6).

La modelación comenzó a tener importancia en agronomía y en otras áreas biológicas, dada su capacidad de suministrar información en un enfoque sistemático de todo el sistema biológico o de una parte, como es el sistema de producción agrícola (8).

Hoy más que nunca, el aumento de la producción de alimentos depende de la utilización prudente de los recursos. 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 (9).

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 y los efectos de los principales factores involucrados en el desarrollo agrícola, para poder elaborar alternativas viables de progreso en nuestros trópicos americanos, conservando los recursos naturales mediante su utilización racional, 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 los cultivos es de gran utilidad (10).

Los modelos de simulación son una herramienta que facilitan la toma de decisiones, para seleccionar la

mejor alternativa que se puede lograr con una combinación de recursos y precios, y muestra cuánto se podría pagar por una unidad más de cada recurso que se agota (11).

La aparición de los modelos de simulación ocurre a partir de la década del 50 con modelos descriptivos y matemáticos de los procesos involucrados; luego a mediados de los 60 aparece el concepto de sistemas dinámicos, que incluyen la variable tiempo y que representaban el flujo de esos procesos y sus interacciones. En esta etapa dos importantes precursores fueron W. G. Duncan en la *University of Kentucky* y C. T. de Wit en la *Agricultural University de Wageningen*, que 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, desarrollando modelos simples que consideraban únicamente la producción potencial relacionada con la radiación y la temperatura. En la década del 70 se formaliza aquel concepto de dinámica de sistemas y en los 80 se refina mediante técnicas de computación la verificación, validación y evaluación de esos modelos. En esta última década aparecen los primeros modelos de simulación para los cultivos de maíz, soja, trigo y arroz, incluidos en el paquete DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*) "Sistema de apoyo para las decisiones de transferencia agrotecnológica". 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 (12). La aparición a mediados de los 90 de la tecnología informática permitió una mayor utilización de estos modelos para el estu-

dio y resolución de problemas específicos como: desarrollo y crecimiento de los cultivos, evaluación de respuesta a la fertilización, estrategias de riego, situaciones de estrés, predicción de pérdidas por erosión, lixiviación de pesticidas, contaminación del ambiente, calentamiento global de la atmósfera, entre otros (8).

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 (13).

MODELOS Y SU UTILIZACIÓN

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 (13).

Los modelos de simulación se clasifican en dos grandes grupos: empíricos y mecanicistas. Los primeros son descriptivos, se derivan de datos observados sin involucrar procesos fisiológicos y tienen escasa capacidad explicativa. Por el contrario, los modelos mecanicistas poseen capacidad explicativa de la fisiología del cultivo, porque consideran aspectos como la temperatura, la radiación fotosintéticamente activa, el índice de área foliar, la fotosíntesis, la respiración y la eficiencia en el uso de la radiación (14). No obstante, dentro de estas clasificaciones existen otras categorías, que de acuerdo a sus características han sido nombradas de diferente forma.

Los modelos que estudian las relaciones biológicas para describir el comportamiento de un sistema se les denominan modelos mecanicistas, a diferencia de los modelos empíricos que describen las relaciones matemáticas entre los datos (15).

Modelos empíricos o descriptivos: Estos modelos describen, de un

modo simplificado, el comportamiento de un cultivo.

El desarrollo de un modelo empírico se basa en la individualización, a partir de datos experimentales, de una o más ecuaciones matemáticas, para la representación del proceso examinado.

Las principales carencias de este tipo de aproximación son las de investigar:

- ⇒ en la limitada validez en ambientes diversos a los originales
- ⇒ en el empleo de las ecuaciones que a menudo no tienen un significado biológico (7).

Los modelos empíricos son descripciones directas de los datos observados y se expresan generalmente como ecuaciones de regresión (con uno o varios factores) y se utilizan para estimar la producción final. Ejemplos de tales modelos incluyen la respuesta de la producción a la aplicación de fertilizantes, la relación entre el área de la hoja y la cantidad de hojas de una planta dada, la relación entre la altura del tallo y el número de tallos, su diámetro y la producción final de caña de azúcar (13).

Modelos mecanicistas. Estos modelos son aquellos que describen el comportamiento del sistema en términos de propiedades de bajo nivel. Por tanto, existe comprensión o explicación en los niveles inferiores. Estos modelos tienen la habilidad de imitar importantes procesos físicos, químicos o biológicos, y describir cómo y porqué resulta una respuesta particular. El analista comienza usualmente con algún empirismo y en la medida que se gana en conocimiento se introducen variables y parámetros adicionales para explicar la producción de la cosecha. Así, el analista adopta un enfoque reduccionista. La mayoría de los modelos de crecimiento de cultivos caen dentro de esta categoría (13).

Modelos estáticos y dinámicos. Los modelos estáticos representan relaciones entre las variables que no se modifican en el tiempo y, por tanto, se conoce su valor final y no su evolución en el tiempo (ejemplo simulación de la intercepción solar, fotosín-

tesis) (7). Los modelos dinámicos describen el modo en el cual el sistema cambia en el tiempo y, por lo tanto, es posible seguir la evolución temporal de cada una de las variables del sistema (ejemplo: balance de nitrógeno e hídrico en el suelo) (7).

Modelos determinísticos y estocásticos. Los modelos determinísticos atribuyen un solo valor a cada variable del sistema (7). Hacen predicciones para cantidades (por ejemplo, producción de la cosecha) sin ninguna distribución probabilística asociada, varianza o elemento aleatorio. En los sistemas biológicos y agrícolas son normales las variaciones, debido a imprecisiones en los datos recogidos y a heterogeneidad del material con que se ha trabajado. En algunos casos, los modelos determinísticos pueden ser adecuados a pesar de estas variaciones inherentes, pero en otros pueden resultar insatisfactorios, por ejemplo, en la predicción de lluvia. Cuanto mayor sea la incertidumbre del sistema, más inadecuados se vuelven los modelos determinísticos (13). Los modelos estocásticos señalan, en cambio, para una variable una distribución de valores (7).

Cuando la variación y la incertidumbre alcanzan un nivel alto, se hace recomendable desarrollar un modelo estocástico que dé un valor medio esperado con una varianza asociada. Sin embargo, los modelos estocásticos tienden a ser difíciles de manipular y rápidamente se vuelven muy complejos. Por consiguiente, es recomendable intentar resolver el problema inicialmente con un enfoque determinístico y utilizar el enfoque estocástico solo si los resultados no son adecuados o satisfactorios (13).

Trabajos realizados en Cuba con la aplicación de modelos empíricos

Desde la década de los 80 los modelos empíricos han sido ampliamente usados por muchos investigadores cubanos, con el fin de describir el crecimiento de disímiles cultivares, entre estos trabajos podemos mencionar algunos de los desarrollados en el INCA (Instituto

Nacional de Ciencias Agrícolas), donde se realizó una comparación entre diferentes funciones matemáticas para describir el crecimiento de algunos órganos en posturas de café crecidas en vivero; además, se plantea que desde este tiempo se ha venido trabajando en Cuba en la aplicación de diferentes funciones matemáticas para describir el crecimiento de diferentes cultivos, como papa, cítricos, tomate y café; esto permite estimar el valor de la variable en cuestión en cualquier momento, dentro del rango en que se realizó el estudio (16).

Se determinó, también, el crecimiento de plántulas de cafeto en diferentes condiciones de aviveramiento, con el objetivo de conocer la influencia del uso o no de la sombra durante el período de aviveramiento, la altura sobre el nivel del mar y dos fechas de siembra, en la dinámica de crecimiento de plántulas, así como en la extensión del período de aviveramiento (Figura 1); los datos fueron ajustados a una función exponencial polinómica de segundo grado ($y = a + b_0 + b_1x + b_2x^2$), obteniéndose valores de R^2 entre 0.96 y 0.98, y se establecieron dinámicas para cada una de las variables evaluadas (17).

Trabajos realizados en Cuba con la aplicación de modelos determinísticos

Durante tres décadas se han aplicado estos modelos, en lo fundamental, en países de clima templado. Por los beneficios que aportan, especialistas de la Universidad Agraria de La Habana, del Instituto Nacional de Riego y Drenaje, y el de Investigaciones de la Caña de Azúcar, elaboraron los primeros trabajos para utilizar en nuestras condiciones geográficas cinco de los modelos agrohidrológicos de alcance internacional (3).

Por primera vez en el país, se ofrecen los parámetros que describen las propiedades hidráulicas para los principales grupos de suelos cubanos. Esta investigación le confiere validez al modelo Swcrop para ser utilizado en el cultivo de la papa en condiciones tropicales; antes solo se empleaba en clima templado (3).

También se obtiene una versión del modelo Swap para la caña de azúcar. Este predice los daños que puedan originarse por cambios climáticos, características del suelo y fecha apropiada para la siembra. Una Unidad Básica de Producción Cooperativa del central Héctor Molina en La Habana, lo puso en práctica e informaciones preliminares anticipan un saldo productivo y económico alentador.

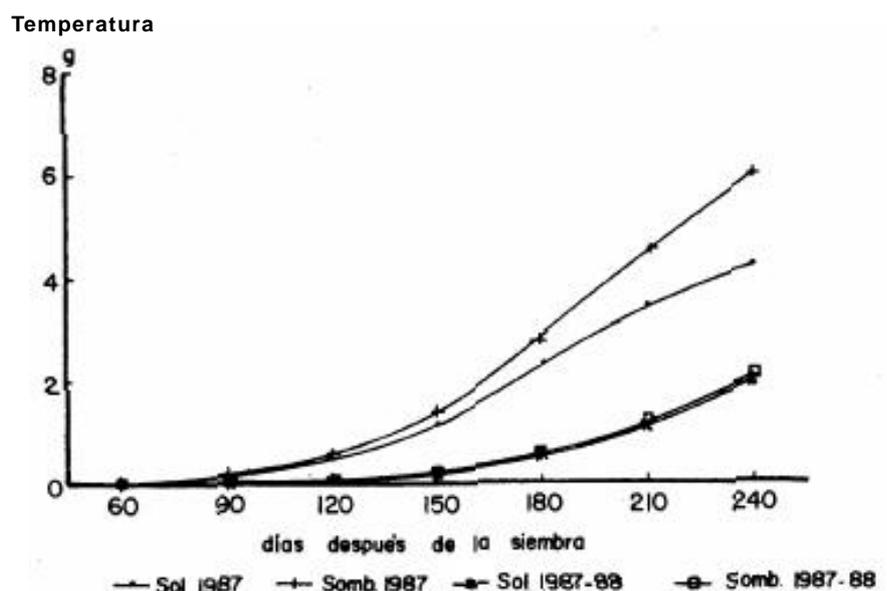


Figura 1. Masa seca total en ambas campañas en el sitio de Cumanayagua

La importancia de este trabajo es facilitar herramientas que sean útiles para lograr una correcta estrategia agrícola y aprovechar al máximo el agua disponible, en tiempos de prolongada sequía como los actuales (3).

En el Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje se ha trabajado durante varios años en la evaluación y validación de diferentes modelos de simulación de transferencias hídricas, fundamentalmente para las condiciones edafoclimáticas de la región del sur de La Habana (18, 19).

Investigadores del Instituto Nacional de Riego y Drenaje de Cuba realizaron el trabajo titulado "Posibilidades de los modelos de simulación como herramienta eficaz en los estudios del manejo óptimo del agua y la fertilización en diferentes sistemas de cultivos agrícolas", con el objetivo de resumir y discutir las principales características de los modelos de simulación (STIC y MACRO) disponibles para la investigación en el Instituto de Riego y Drenaje de Cuba, y sus posibilidades para la predicción del comportamiento de los cultivos agrícolas ante diferentes manejos de agua, fertilización y ambientes climáticos (20).

De igual forma, se desarrolló el trabajo titulado Coeficientes de cultivo de la cebolla y su determinación con el modelo ISAREG, con el objetivo de explorar a partir de datos históricos los resultados de dos décadas de experimentos de campo de cebolla cultivada en la Estación Experimental de Riego y Drenaje, para la calibración y validación del modelo ISAREG, con el fin de obtener los coeficientes de cultivo (K_c) y la fracción de agotamiento (p) adecuada para este cultivo (21).

Los modelos de simulación respecto a cultivos agrícolas son una categoría de modelos ambientales que, típicamente, predicen el rendimiento de los cultivos, el crecimiento y desarrollo de las plantas, y la dinámica de la humedad y otros nutrientes (5).

Un modelo de cultivo es la simulación dinámica del crecimiento

por el uso de la integración numérica de los procesos constituyentes con la ayuda de las computadoras. Más específicamente, esto implica un programa de computación que describe la dinámica del crecimiento del cultivo en relación con el ambiente, operando en pasos de tiempo y un orden de magnitud por debajo de la estación del crecimiento, y con la capacidad de obtener variables que describen el estado del cultivo en diferentes puntos del tiempo; por ejemplo, la biomasa por unidad de área, el estadio de desarrollo, el rendimiento, el contenido de nitrógeno de las hojas, etc (13).

Si definimos a los modelos de cultivos como la representación matemática de una síntesis de mecanismos y procesos (22), es erróneo pensar que podamos representar perfectamente los sistemas biológicos y, por lo tanto, la modelización está orientada generalmente a ver la respuesta a aspectos precisos como: predicción de la producción, potencialidad de cultivares, manejo de la irrigación, entre otros.

Los modelos de simulación agronómica son herramientas que integran información, y permiten analizar y cuantificar las relaciones existentes entre los factores mencionados y sus efectos como componentes del sistema, para evaluar diferentes planteos productivos o analizar un factor manteniendo los otros constantes; por ejemplo, la variación del rendimiento por efecto del clima sin modificar el manejo, el genotipo y el suelo. Numerosos modelos han sido desarrollados por diferentes grupos de trabajo y cada uno de ellos tiene fortalezas y debilidades para predecir las variables de respuesta. Es por ello necesario validar los modelos en los ambientes en donde se utilizarán (23).

No obstante la capacidad relativa de los modelos existentes y la credibilidad de sus resultados es todavía un aspecto importante a valorar. Esto está asociado primeramente a la no disponibilidad de datos apropiados para la validación del modelo y, por otra, a la inadecuación

en las representaciones de los procesos e interacciones del sistema agua-suelo-planta-atmósfera. Es por tanto muy importante antes de adoptar uno u otro modelo para aplicaciones agrícolas y medioambientales que se realice un trabajo de evaluación y validación exhaustivo de estos (20).

Modelo DSSAT (Sistema de Apoyo de Decisiones para la Transferencia de la Agrotecnología). 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 Sistema de Apoyo para Decisiones de Transferencia de Agrotecnología (*DSSAT*, por sus siglas en inglés) (24).

Los modelos de simulación de cultivos del *DSSAT* utilizan archivos de datos para clima, suelo y manejo del cultivo. Estos archivos se utilizan para proveer en la simulación un ambiente parecido a donde crece el cultivo. El *DSSAT*, además, incluye varios programas de aplicación para análisis estacionales (25), rotación de cultivo y análisis secuencial (26), y análisis espacial a escala de campo o regional (27, 28). Los modelos proveen una de las mejores aproximaciones del comportamiento de los cultivos, integrando nuestro entendimiento de los procesos complejos de las plantas influenciados por el clima, el suelo y las condiciones de manejo (29).

El modelo *DSSAT* ha sido usado por investigadores de todo el mundo en los últimos 15 años; este paquete tiene incorporado 16 modelos de cultivos diferentes, con un *software* que facilita la evaluación y aplicación de estos modelos de cultivos para diferentes propósitos (30). Estos permiten simular el crecimiento de cultivos de importancia económica y han demostrado alta confiabilidad en distintas condiciones

de clima, suelo y manejo (31). Con este modelo es posible organizar y archivar bases de datos sobre clima, suelos, cultivos, experimentos y precios; simular producciones de cultivo en una o varias épocas y en secuencias; analizar resultados y representar gráficamente simulaciones; analizar variabilidad espacial y evaluar diferentes prácticas de manejo específicas a una explotación o parte de ella (32).

El DSSAT ha tenido los siguientes impactos (33):

- ha sido adoptado por más de 1500 investigadores en 91 países
- utilizado en más de ocho proyectos nacionales e internacionales sobre el cambio climático
- cientos de aplicaciones desarrolladas independientemente de los creadores originales
- validó el enfoque de sistemas para la transferencia tecnológica
- dio lugar a la formación de ICASA.

El DSSAT de la Red de Sitios Indicadores Internacionales para la Transferencia de la Agrotecnología (IBSNAT) incluye un sistema de manejo de base de datos, modelos de simulación de cultivos y programas de aplicación. Hoy en día, los modelos de simulación forman parte del Consorcio para la Aplicación de Sistemas Agrícolas ICASA (International Consortium for Agricultural System Application) (34).

➤ *Ejemplos de la salidas del modelo DSSAT*

Los modelos utilizan un juego estándar de datos de acceso (*inputs*) y producen un juego estándar de datos de salida (*outputs*), aun cuando ellos describen los procesos de crecimiento de diferentes maneras; todos utilizan los mismos procedimientos para simular los procesos de suelo, agua y nitrógeno (24).

Las siguientes gráficas son ejemplos de salidas obtenidas de modelos incluidos en el paquete DSSAT.

La Figura 2 ha sido construida a partir de datos que son obtenidos de los sistemas de información geográficos que incluyen los modelos del paquete DSSAT. De ellos se puede observar una comparación estable-

cida entre los rendimientos del cultivo de la soya alcanzados en una zona específica.

La Figura 3 muestra los rendimientos del maíz observados contra los rendimientos simulados. En ella se puede observar que los puntos se encuentran ajustados debido a su proximidad hacia el centro.

Ejemplos de modelos de cultivo más conocidos (Tabla I)

Entre los modelos más citados en la literatura se encuentran: UNSAT; DRAINMOD; SWATRE/SWACROP; CERES; WOFOST;

LEACHW; PREFLO; MACRO; STICS; APSIM; entre otros (20).

SIMULACIÓN DE CULTIVOS

La simulación constituye técnicas 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. Estas hipótesis constituyen un modelo que no es más que una representación simplificada de un sistema que se construye para estudiar su comportamiento (35).

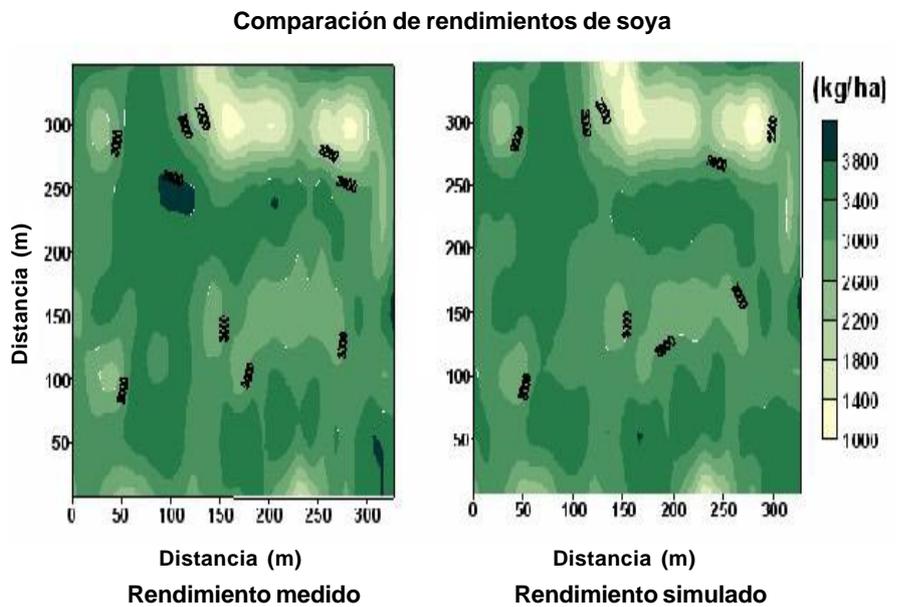


Figura 2. Resultados de los datos que brinda el modelo DSSAT mediante los sistemas de información geográfica (33)

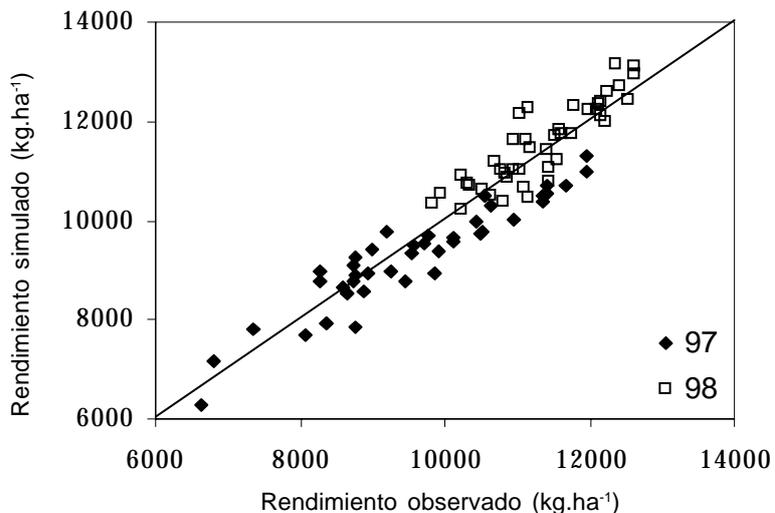


Figura 3. Rendimiento de maíz simulado y observado durante dos años, parámetros de suelo medidos en un campo en Michigan (33)

Tabla I. Algunos de los modelos de cultivo más conocidos (13)

Programa	Detalles
SLAMII	Operaciones de cosecha de forraje
SPICE	Plantas completas de flujo de agua
REALSOY	Frijol de soya
IRRIGATE	Modelo de planeamiento de irrigación
COTTAM	Algodón
APSIM	Estructura de modelación para un rango de cultivos
GWM	Modelo general de hierba mala en los surcos de cultivo
CropSyst	Trigo y otros cultivos
SIMCOM	Cultivo (módulos de CERES) y economía
LUPINMOD	Lupino
TUBERPRO	Patatas y enfermedades
SIMPOTATO	Patatas
WOFOST	Trigo, maíz, agua y nutrientes
WAVE	Agua y agroquímicos
SUCROS	Modelos de cultivos
ORYZAI	Arroz, agua
SIMRIW	Arroz, agua
SIMCOY	Maíz
CERES-Rice	Arroz, agua
GRAZPLAN	Pastos, agua, corderos
EPIC	Calculador del impacto de la erosión en la productividad
CERES	Serie de modelos de simulación de cultivos
DSSAT	Estructura de modelos de simulación de cultivos incluyendo módulos de CERES. CROPGRO y CROPSIM
QCANE	Caña de azúcar, condiciones potenciales
APSIM-Sugarcane	Caña azúcar, crecimiento potencial, agua y estrés nitrógeno

El concepto de simulación debe ser dinámico principalmente por dos razones: que es la mejor comprensión de los procesos involucrados en la producción de cultivos y, por otro lado, para la resolución de problemas. Los modelos que sirven como herramienta para resolver modelos suelen ser modelos multidisciplinarios (8).

La predicción del rendimiento de los cultivos anticipada a la cosecha ha sido un objetivo prioritario de la agrometeorología, con el fin tanto de aumentar el conocimiento de las relaciones clima/cultivo como para generar información que se pueda aprovechar oportunamente en la planificación y el manejo de la producción agropecuaria (36). El comportamiento de variables frente a distintas condiciones de suelo, clima, manejo o variedad está también sujeto a interacciones complejas, por lo que ha sido recientemente abordada a través de herramientas de simulación (23).

La simulación computarizada permite reducir tiempos, esfuerzos y recursos necesarios en la gestión agrícola. Los modelos de simulación de rendimiento de cultivos reproducen su comportamiento, y permiten seleccionar distintos ambientes de simulación y analizar la respuesta ante estas variaciones (37).

La simulación involucra el desarrollo de un modelo y su uso para caracterizar el sistema y sus interacciones con un mayor grado de detalle (8).

Por otro lado, la utilización de modelos de simulación es una herramienta que utiliza información obtenida a través de experiencias anteriores y permite proyectar los resultados físicos y económicos, teniendo en cuenta todos los factores que interactúan en un determinado ambiente. Ante la variabilidad y complejidad de los sistemas de producción actuales, los modelos de simulación se presentan como una alternativa para ser empleados en los

escenarios futuros (38). Aunque la técnica de simulación generalmente se ve como un método de último recurso, recientemente los avances en las metodologías de simulación y la gran disponibilidad de *software* que actualmente existe en el mercado han hecho posible que la técnica de simulación sea una de las herramientas más ampliamente usadas en el análisis de sistemas, lo que ha sugerido que es muy recomendable un estudio de simulación, porque presenta ventajas tales como (35).

- ★ Permite estudiar sistemas reales que no se pueden evaluar analíticamente. En la práctica, la mayoría de los sistemas reales se estudian mediante simulación. De hecho, la simulación es la técnica de investigación operativa más utilizada.
 - ★ Hace posible estimar el comportamiento de un sistema existente, si se modifican algunas de las condiciones de funcionamiento actuales. Además, para probar si esos cambios producen mejoras, no es necesario interrumpir el funcionamiento del sistema real.
 - ★ Se pueden comparar distintas alternativas de diseño (o de formas de operar de un sistema), antes de construirlo, para ver cuál se comporta mejor.
 - ★ Permite estudiar en poco tiempo la evolución de un sistema en un período largo de tiempo: se pueden evaluar años de experiencia en el sistema real en unos pocos minutos de simulación. Alternativamente también permite lo contrario: estudiar los trabajos detallados de un sistema en un período de tiempo extendido.
- A diferencia de las ventajas mencionadas, la técnica de simulación presenta el problema de requerir equipos de cómputo y recursos humanos, en ocasiones costosas. Además, generalmente se requiere bastante tiempo para que un modelo de simulación sea desarrollado y perfeccionado, lo que ha sugerido que un estudio de simulación presenta desventajas tales como (35):
- ★ No produce resultados exactos, sino estimaciones. Esto hará ne-

cesario utilizar las técnicas estadísticas para saber, por ejemplo, cuántas veces hay que ejecutar la simulación (número de muestras) para cada conjunto de datos de entrada y realizar estimaciones fiables de los parámetros de interés.

- ★ Desarrollar un modelo de simulación suele ser caro y lleva tiempo.
- ★ Es difícil demostrar la validez del modelo. Si el modelo no es válido, los resultados son poco útiles, ya que la información que estamos obteniendo del modelo de simulación no es representativa del sistema real que nos interesaba estudiar.

FUNCIÓN DE LOS MODELOS

Los modelos matemáticos y, en particular, los modelos aplicados a la biología pueden ser una herramienta importante para entender la dinámica de un fenómeno. De hecho, las biomatemáticas cada vez juegan un papel más importante en el estudio de la biología, que se ve reflejado en el creciente número de publicaciones sobre el tema (39).

Los llamados modelos de simulación, mediante el uso de computadoras, constituyen un elemento importante para tomar decisiones en la agricultura al cuantificar, interpretar y predecir las necesidades hídricas de los cultivos y el desarrollo de estos y sus rendimientos (3).

Los modelos pueden ayudar a la comprensión de interacciones genéticas-fisiológicas-ambientales, con una integración interdisciplinaria. Los modelos tienen varias aplicaciones actuales y potenciales en respuesta a temas relacionados con la investigación, el manejo del cultivo y planificación. Los modelos 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 tales como: prácticas culturales, fertilización, riego y uso de plaguicidas (2).

Modificando la escala de espacio y tiempo, los modelos nos per-

miten además abordar fenómenos climáticos como el ENOS (El Niño Oscilación del Sur), 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 (40).

Los modelos de simulación son 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 (1).

Los modelos de simulación también se utilizan para aumentar nuestro entendimiento de un proceso ecológico en particular. Muchas veces un modelo se construye con el objetivo de mejorar la comprensión que se tiene de un determinado proceso ecológico, como por ejemplo la fotosíntesis. La idea es describir el proceso en gran nivel de detalle, de manera que la representación sea válida para un conjunto amplio de condiciones ambientales. Un buen modelo será capaz de revelar interacciones entre los diferentes componentes que no eran evidentes al estudiar cada uno de los procesos separadamente y nos permitirá ensayar experimentos que no se podrían realizar en el sistema real (41).

Los modelos de cultivo han sido usados como herramientas de investigación, que permiten la integración del conocimiento del funcionamiento de los cultivos, en el análisis de experimentos a campo y en la evaluación del impacto en la selección de características particulares de las plantas. También ha sido probada su utilidad como herramienta de enseñanza en agronomía y fisiología de plantas, para mostrar cómo estas reaccionan a los factores ambientales y las prácticas culturales (42).

Finalmente, el uso de los modelos hace posible la experimentación controlada en situaciones en que los experimentos directos serían imprácticos o prohibitivos por su costo.

AGRICULTURA DE PRECISIÓN (AP)

En la actualidad la agricultura de precisión juega un papel fundamental en el ahorro de recursos, puesto que mediante esta se trata de minimizar los costos y obtener los mayores rendimientos posibles. La modelación matemática del rendimiento y sus componentes fisiológicos, genéticos y de manejo, como el desarrollo, el crecimiento, la relación con el suelo, el agua, el ambiente, los genotipos utilizados y diferentes procesos del manejo de los cultivos forma parte integral de la AP (43).

La creación y el desarrollo de bases de datos amplias en la agricultura, unidas a las tecnologías de sistemas de información como los Sistemas de Información Geográfico (SIG), Sistemas de Posición Global (GPS) y otras relacionadas, ligadas al desarrollo de sensores remotos han posibilitado el surgimiento de una ciencia o conjunto de ciencias que se ha dado en llamar Agricultura de Precisión (AP). La AP puede definirse como el conjunto de tecnologías y técnicas utilizadas por el hombre para realizar mejor el manejo de los cultivos agrícolas, utilizar las cantidades específicas y necesarias de nutrientes, agua y otros suministros para obtener el máximo de rendimiento al menor costo posible (43).

La AP constituye un valioso instrumento para diagnosticar con exactitud problemas de la producción agrícola, adoptar decisiones y obtener respuestas satisfactorias en los índices de rendimiento agrícola. Prácticamente consiste en actuar hasta con el más mínimo detalle en el sitio adecuado y momento oportuno, a partir de las novedades científicas que ofrecen la informática y la tecnología. En Cuba, se avanza en la AP y existen proyectos financiados por el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente en la agricultura

cañera, entre ellos la confección de un mapa de rendimiento de la caña que tuvo impacto mundial. Miguel Esquivel, especialista del Centro Nacional de Producción de Animales de Laboratorios (CENPALAB), explicó que internacionalmente concluyó un estudio de las tecnologías que iban a tener mayor impacto en la economía a nivel mundial. De las 10 seleccionadas, la agricultura de precisión fue una de ellas y comprende una correcta combinación de tecnologías, recursos, insumos, variedades y otros (44).

Impactos de la agricultura de precisión (33).

- cooperación entre industrias y universidades
- experimentación en las granjas
- mayor eficiencia en la producción
- mejor cumplimiento con los reglamentos de seguridad laboral y ambiental
- aumenta la demanda para productos adicionales
- promueve la transferencia tecnológica a los productores y sus asesores por medio de la informática.

CONSIDERACIONES GENERALES

A partir de los elementos brindados en este trabajo, se puede concluir que los modelos constituyen una herramienta muy útil para poder desarrollar una agricultura eficiente, desde el punto de vista económico, pero tan o más importante es poder hacer un uso racional de los recursos naturales, teniendo en cuenta la conservación del medio ambiente y sobre todo el recurso suelo, los que en Cuba en una gran parte están bastante degradados. En los próximos cuatro años se debe concluir un estudio donde se utilice un modelo matemático para determinar el mejor manejo de un grupo de cultivos y recomendar aquellos lugares donde resulte más aconsejable su desarrollo, teniendo en cuenta los cambios climáticos que están ocurriendo en el mundo.

REFERENCIAS

1. Bowen, W. y Jaramillo, R. Modelos de dinámica de nutrientes en el suelo y en la planta. En: Congreso Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo [CD-ROM archivo]. Sociedad Ecuatoriana de la ciencia del Suelo (7:2000 oct. 19-20 octubre:Quito), 2001.
2. Meira, S. y Guevara, E. Uso de modelos de simulación como herramienta para la toma de decisiones en el cultivo de soja. [Consultado: 17/09/07]. Disponible en: <www.elsitioagricola.com>. 2003.
3. Ruiz, M. E. Aliados de la agricultura. Periódico Granma Internacional. Año 11, no. 279, 14 de abril de 2005.
4. Soto, O. Estudio y modelación de algunas variables que influyen en el rendimiento agrícola de la caña de azúcar. [Tesis de Diploma], Facultad de Biología, Universidad de La Habana, 2003, 65 p.
5. Soto, O.; Galvéz, G. y Sigarroa, A. Estudio y modelación de algunas variables que influyen en el rendimiento agrícola de la caña de azúcar. Evento ATAC. 2004.
6. Wadsworth, J. Análisis de sistemas de producción animal. Tomo 2: Las herramientas básicas, 2008. (Estudio FAO Producción y Sanidad Animal 140/2).
7. Bandi, M. Instrumentos para el monitoreo del impacto ambiental sobre la producción agrícola. Modelos para cultivos. [Consultado: 26/03/08]. Disponible en: <http://www.ciomta.com.ar/downloads/modelocultivo.pdf>. 2003.
8. Guevara, E. La simulación del desarrollo, crecimiento y rendimiento en maíz. [Consultado: 08/10/07]. Disponible en: <http://www.fertilizando.com/articulos/simulaciondesarrollocrecimientoyrendimientoenmaiz.asp>. 2007.
9. Universidad de Georgia. Assessing crop production, nutrient management, climatic risk and environment sustainability. Training program on DSSAT version 4, 2008
10. Corporación colombiana de investigación agropecuaria. Subdirección de investigación e innovación. Oficina asesora de educación y extensión programa nacional de biometría. En: Taller de Aplicación de modelos de simulación para la evaluación de la producción y las prácticas de manejo en sistemas agrícolas bajo DSSAT versión 4, julio 7-julio 11. [Consultado: 24/03/08]. Disponible en: <http://www.fedepalma.org/document/2003/taller_dssat.doc>. 2003.
11. Holmann, F. El uso de modelos de simulación como herramienta para la toma de decisiones en la promoción de nuevas alternativas forrajeras: El caso de Costa Rica y Perú. En: Reunión Latinoamericana de Producción Animal (ALPA), (16:2002 mar. 28-31:Montevideo), 2002.
12. Barrett, J. R. y Nearing, M. A. Humanization of decision support using informations from simulations. p. 1-17. En: Peart R. and R.B. Curry (eds) Agricultural System Modelling and Simulation. New York:Marcel Dekker, 1998.
13. Gálvez, G. Modelación del crecimiento de las plantas. Modelación de cultivos agrícolas. En: Seminario de modelación de cultivos. (1:2008 mar. 13-14), 2008.
14. Refugio, J. /et al./ Modelos empíricos del crecimiento y desarrollo de tomate podado a tres racimos. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 2004, vol. 17, no. Especial 1, p. 63-67.
15. Vargas, L. /et al./ Modelo para la estimación de tres parámetros ruminales biológicos. *INCI*, 2004, vol. 29, no. 6.
16. Soto, F. Crecimiento de posturas de cafetos en viveros móviles bajo sombra controlada. Ajuste a diferentes funciones matemáticas. *Cultivos Tropicales*, 1986, vol. 8, no. 4, p. 83-90.
17. Soto, F. /et al./ Dinámica del crecimiento de plántulas de cafeto bajo diferentes condiciones de aviveramiento. *Cultivos Tropicales*, 1991, vol. 12, no. 1, p. 77-85.
18. Rodríguez, J. A. y López, T. Validación y análisis de sensibilidad del modelo MACRO en un suelo Orthic Ferrasol del Sur de La Habana. *Investigación Agraria. Producción y Protección Vegetales*, 2000, vol. 15, no. (1-2), p. 47-55.

19. López, T.; Dueñas, G.; Sierra, J.; Ozier-Lafontaine, H.; González, F.; Giral, E.; Chaterlán, Y. y Cid, G. Simulación del manejo del riego y la fertilización nitrogenada del maíz sobre suelo Ferralítico del sur de La Habana. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 2001, vol. 10, no. 3, p. 59-66.
20. López, T. *et al.*. Posibilidades de los modelos de simulación como herramienta eficaz en los estudios del manejo óptimo del agua y la fertilización en diferentes sistemas de cultivos agrícolas. En: Congreso de Riego, 2006.
21. Chaterlan, Y. *et al.*. Coeficientes de cultivo de la cebolla y su determinación con el modelo isareg. En: Taller Internacional: «Modernización de Riegos y Uso de Tecnologías de Información», con participación de las redes de riego del PROCISUR Y CYTED. (2007 sep. 17-18:La Paz), 2007.
22. Bonhomme, R. y Ruget, F. Modélisation du fonctionnement d'une culture de maïs: cas de CORNGRO et CERES-Maize. En: D. Picard (ed) *Physiologie et production du maïs*. Paris:INRA, 1991. p. 385-392.
23. Salvagiotti, F.; Castellarin, J. y Pedrol, H. Análisis de la respuesta a la fertilización nitrogenada utilizando el modelo CERES Wheat en diferentes condiciones ambientales de la región pampeana norte. Para mejorar la producción. 2003, no. 26.
24. Jones, J. W.; Tsuji, G. Y.; Hoogenboom, G.; Hunt, L. A.; Thornton, P. K.; Wilkens, P. W.; Imamura, D. T.; Bowen, W. T. y Singh, U. Decision support system for agrotechnology transfer:DSSAT, 1998, vol. 3, p. 157-177.
25. Thornton, P. K. y Hoogenboom, G. A computer program to analyze single season crop model outputs. *Agronomy Journal*, 1994, no. 86, p. 860-868.
26. Thornton, P. K.; Hoogenboom, G.; Wilkens, P. W. y Bowen, W. T. A computer program to analyze multiple season crop model outputs. *Agronomy Journal*, 1995, no. 87, p. 131-136.
27. Engel, T.; Hoogenboom, G.; Jones, J. W. y Wilkens, P. W. AEGIS/WIN, a computer program for the application of crop simulation models across geographic areas. *Agronomy Journal*, 1997, no. 89, p. 919-928.
28. Thornton, P. K.; Booltink, H. W. G. y Stoorvogel, J. J. A computer program for geostatistical and spatial analysis of crop model output. *Agronomy Journal*, 1997, no. 89, p. 620-627.
29. White, J. W. y Hoogenboom, G. Gene-based approaches to crop simulation: Past experience and future opportunities. *Agronomy Journal*, 2003, no. 95, p. 52-64.
30. Jones, J. W. *et al.*. Modelling cropping systems: science, software and applications. *European Journal of Agronomy*, 2003, v. 18, no. 3-4, p. 235-265.
31. Jones, J. W. Decision support systems for agricultural development. En: Penning de Vries, F. W. T (ed.). *System approaches for agricultural development*. Países Bajos: Kluwer Academic Publishers, 1993, p. 459-471.
32. Giraldo, L. M.; Lizcano, L. J.; Gijsman, A. J.; Rivera, B. y Franco, L. H. Adaptación del modelo DSSAT para simular la producción de *Brachiaria decumbens*. *Posturas Tropicales*, 2007, vol. 20, no. 2, p. 2-12.
33. Jones, J. W. y Royce, F. La investigación agrícola en la era informática. En: Seminario de modelación de cultivos (1:2008 mar. 13-14), 2008.
34. Saliceti, M. Evaluación de dos poblaciones de habichuela (*Phaseolus vulgaris* L.) para ser utilizadas en el modelo de simulación CROPGRO. [Tesis de Maestría]; Universidad de Puerto Rico. 2005, 88 p.
35. Dorado, C. Simulación de sistemas. [Consultado: 19/12/07]. Disponible en: <<http://www.monografias.com/trabajos20/simulacion-sistemas/simulacion-sistemas.shtml>>. 2007.
36. Casa, A. y Ovando, G. Normalized difference vegetation index (NDVI) and phenological data integration to estimate county yield of corn in Córdoba, Argentina. *Agricultura Técnica*, 2007, vol. 67, no. 4, p. 362-371.
37. CIOMTA. Aplicación del Sistema Integrado en la simulación del rendimiento del cultivo de maíz. [Consultado: 17/09/07]. Disponible en: <<http://www.ciomta.com.ar/resultmaiz.html>>. 2007.
38. Forjan, O. Modelos de simulación de crecimiento y desarrollo de los cultivos. AgroBarrow Digital. 2002, no. 27.
39. Delgadillo, S. E.; Kú, R. A. y Vela. L. V. Modelación matemática del control de plagas en un cultivo de brócoli. Epígrafe, Revista del Dpto. de Matemáticas y Física de la Universidad Autónoma de Aguascalientes. [Consultado: 24/03/08]. Disponible en: <<http://www.cns.gatech.edu/~luzvela/epigrafe/segnum/plagas.pdf>>. 2006.
40. Royce, F.; Meira, S. y Guevara, E. Optimización de manejo de frijol soja y maíz, utilizando modelos de simulación e información de las fases ENSO en Pergamino, Argentina. En: Seminario Científico del Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. (11:1998 nov.:La Habana), 1998.
41. GAIA. Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. Modelos de simulación en el área ambiental. [Consultado: 17/09/07]. Disponible en: <http://cesimo.ing.ula.ve/GAIA/CASES/VEN/ESPANOL/modelos.html>, 1998.
42. Wery, J. y Lecoeur, J. Learning crop physiology from the development of a crop simulation model. *J. Nat. Resour. Life Sci. Educ.*, 2000, vol. 29, p. 1-7.
43. Gálvez, G. *et al.*. Modelación del rendimiento de la caña de azúcar en Cuba. Casos de estudio. Seminario de modelación de cultivos. (1:2007 mar. 13-14), 2007.
44. Vázquez, A. La agricultura de precisión se extiende en Cuba. El Habanero digital. [Consultado: 15/04/08]. Disponible en: <<http://www.elhabanero.cubaweb.cu>>. 2004.

Recibido: 30 de junio de 2008

Aceptado: 28 de noviembre de 2008