

Bernardino Candelaria Martínez, Octavio Ruiz Rosado, Felipe Gallardo López, Ponciano Pérez Hernández,
Ángel Martínez Becerra, Luis Vargas Villamil
APLICACIÓN DE MODELOS DE SIMULACIÓN EN EL ESTUDIO Y PLANIFICACIÓN DE LA AGRICULTURA,
UNA REVISIÓN
Tropical and Subtropical Agroecosystems, vol. 14, núm. 3, septiembre-diciembre, 2011, pp. 999-1010,
Universidad Autónoma de Yucatán
México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93921493004>

**Tropical and Subtropical
Agroecosystems**
An international multidisciplinary journal

Tropical and Subtropical Agroecosystems,
ISSN (Versión electrónica): 1870-0462
ccastro@uady.mx
Universidad Autónoma de Yucatán
México

¿Cómo citar?

Fascículo completo

Más información del artículo

Página de la revista

www.redalyc.org

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto



REVISIÓN [REVIEW]

APLICACIÓN DE MODELOS DE SIMULACIÓN EN EL ESTUDIO Y PLANIFICACIÓN DE LA AGRICULTURA, UNA REVISIÓN

[APPLICATION OF SIMULATION MODELS IN AGRICULTURAL RESEARCH AND PLANNING, A REVIEW]

**Bernardino Candelaria Martínez^a, Octavio Ruiz Rosado^a,
Felipe Gallardo López^a, Ponciano Pérez Hernández^a,
Ángel Martínez Becerra^b y Luis Vargas Villamil^b**

^a *Colegio de Postgraduados, Campus Veracruz. Posgrado en Agroecosistemas Tropicales. Línea de Investigación de Agroecosistemas Sustentables, km 85.5, carretera federal Xalapa – Veracruz, Apartado Postal 421, C.P. 91700.*

^b *Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. Periférico Carlos A. Molina s/n. Carretera Cárdenas-Huimanguillo. C.P. 86500. Cárdenas, Tabasco.*

E-mail cmartinez@colpos.mx

** Corresponding author*

RESUMEN

Desde el inicio de la agricultura, hace aproximadamente diez mil años, la humanidad se ha beneficiado de sus productos al satisfacer, con ellos, sus necesidades de alimentación y comercializarlos. Los sistemas de producción agrícola son más organizados y productivos, como resultado del mayor conocimiento sobre agricultura. Sin embargo, la especialización dentro de la agronomía ha propiciado en algunos casos la implementación de innovaciones técnicas que soslayan elementos clave de los sistemas de producción, como los aspectos sociales, culturales, climáticos, o las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, originando el fracaso en la práctica. El uso de los diferentes tipos de modelos dentro de la agricultura ha surgido como una alternativa de planificación e investigación, dado que pueden utilizarse para predecir el comportamiento de una planta o animal con diferentes manejos, las características del suelo, la interacción entre diferentes cultivos, y el comportamiento de sistemas de producción con interacción de ganado y cultivos. Actualmente se ha incorporado el efecto de políticas agrícolas, racionalidad de los productores, características del mercado y aspectos ambientales. Desde el enfoque de los agroecosistemas estos modelos se han usado para simular la sustentabilidad, bajo una visión holística y sistémica. Otra evolución importante ha sido considerar al productor como un sujeto que participa en la modelación y no como un componente más del sistema a modelarse, en el denominado modelaje participativo. Por lo tanto, el objetivo del presente documento es analizar los distintos enfoques de la aplicación de los modelos para el estudio y planificación agrícola, y sus retos.

Palabras clave: Componentes; modelación; sistemas de producción agrícola

SUMMARY

Since the beginnings of agriculture, about ten thousand years ago, mankind has benefited from the use of its products by satisfying needs for food and by trade. The agricultural production systems have become more organized and productive, as a result of a greater knowledge on agriculture. However, specialization in agronomy has led in some cases to the implementation of technical innovations that put out key elements of the production systems, such as social and cultural aspects, climate, and physical, chemical and biological soil properties, that result in failure in the practice. The use of different types of models in agriculture has become an alternative for planning and research, since they can be used to predict the behavior of a plant or animal under different management practices, the soil characteristics, the interaction among different crops, and the behavior of production systems in which livestock and crops interact. Currently the effect of agricultural policies, the rationality of producers, the market characteristics and the environmental aspects have been incorporated. From the point of view of the theory of agroecosystems they have been used to simulate the sustainability, under a holistic and systemic vision. Another important development has been to consider the producer as subject that participates in the modeling process and not as a component of the system that needs to be modeled in what is called the participative modeling. Therefore, the objective of this paper is to analyze the different approaches for the application of the models for the study and planning of agriculture, and their challenges.

Keywords: Components; modeling; agricultural production systems

INTRODUCCIÓN

Un modelo es la representación simplificada de un sistema, donde se describen las variables dependientes e independientes de interés, características y restricciones mediante símbolos, diagramas y ecuaciones. Pueden ser descriptivos o de simulación, en los primeros únicamente se representan los componentes del sistema, mientras que en los segundos se imita el funcionamiento del sistema y se obtienen resultados predictivos, en forma de datos numéricos o gráficos. En el ámbito científico, los modelos se han empleado en diferentes disciplinas, logrando mejorar el conocimiento de las características y el funcionamiento de los sistemas o elementos evaluados; conociendo mejor el problema se ha mejorado en el planteamiento y fundamentación de hipótesis de investigación. Por otro lado, para el manejo y planificación de los sistemas, el uso de modelos permite una representación anticipada de la administración y uso de los componentes y recursos, así como la adición, sustracción o modificación de interacciones y relaciones.

Por las ventajas del modelaje en la exploración de sistemas, y por la importancia de la agricultura en el desarrollo de la humanidad y el uso de los recursos naturales, se ha implementado el uso de modelos para su representación, estudio y planeación, en aras de obtener una producción optimizada, eficiente y sustentable. No obstante, la agricultura constituye una actividad con múltiples implicaciones: biológicas, económicas, sociales, culturales, humanas, políticas y de mercado; por lo que obtener modelos que logren abarcarlas, representarlas y relacionarlas totalmente como sistema, es una tarea difícil de conseguir, pero con gran importancia para complementar los esfuerzos realizados en diferentes campos para lograr el desarrollo de la agricultura. Con base a lo anterior, el objetivo del presente documento es contribuir con un análisis del uso de modelos en la evaluación y planificación de la agricultura, bajo diferentes enfoques.

Definición de un modelo

Un modelo puede ser una representación conceptual, numérica o gráfica de un objeto, sistema, proceso, actividad o pensamiento; destaca las características que el modelador considera más importantes del fenómeno en cuestión, por lo que se emplea para analizar exhaustivamente cada una de sus relaciones e interacciones, y con base en su análisis, predecir posibles escenarios futuros para dicho fenómeno. Así, un modelo puede describirse como una representación simplificada de un sistema real, y es en esencia, una descripción de entidades y la relación entre ellas (García, 2008). Por lo anterior, el modelado o modelaje puede considerarse como un método

eficiente para reducir y entender la complejidad de los sistemas. Un modelo de simulación es un conjunto de ecuaciones que representa procesos, variables y relaciones entre variables de un fenómeno del mundo real y que proporciona indicios aproximados de su comportamiento bajo diferentes manejos de sus variables (Pérez *et al.*, 2006); los cuales, permiten abordar una cuestión puramente teórica, en cuyo caso su finalidad es puramente teórica, o una situación real, orientado a dar una respuesta concreta (García, 2004), formalizar en un modelo de simulación nuestra percepción del fenómeno real y simular el efecto de diferentes alternativas.

Con el uso del modelaje se puede exagerar en la simplificación o en la adición de relaciones o cualidades que en realidad no existen, dependiendo del grado de conocimiento del modelador sobre el fenómeno en cuestión. En este sentido, Medín (2006) define un modelo como una representación esquemática de un sistema dinámico, que no llega a ser un duplicado de la realidad, sino que la simplifica exagerando y omitiendo rasgos. El modelaje no es algo nuevo, pues toda persona en su vida privada y en sus relaciones comunitarias usa modelos para tomar decisiones. Los modelos, al igual que cualquier herramienta empleada para procesar información, tienen como objetivos el mejorar el entendimiento sobre los sistemas en estudio para probar teorías científicas, predecir el resultado de una combinación de situaciones en el sistema, o controlar el sistema estudiado y producir resultados anticipados (Ortega *et al.*, 1999).

A pesar de las limitaciones que tiene el empleo de modelos de simulación en la investigación, como pudieran ser la falta de sistematización de la información, desconocimiento de relaciones entre elementos de los sistemas y la dificultad de integrar y hacer explícitos modelos de gran tamaño, facilita el estudio de los sistemas, principalmente los de tamaños menores y fenómenos específicos, aunque se están realizando importantes avances en el desarrollo de modelos multifactoriales y multidisciplinarios.

Tipos de modelos

Existen diferentes tipos de modelos, en función de la finalidad para la cual se crean o diseñan. Sus clasificaciones son variadas, y buscan dar una idea de sus características esenciales; pueden ser en base a su dimensión, función, propósitos y grado de abstracción. Cada fenómeno de la realidad se puede representar por medio de un modelo; por lo cual, según el número y tipo de fenómenos existentes en el mundo real, será el número y tipo de modelos posibles. Aunque los tipos básicos son icónico, analógico y simbólico o matemático. En este sentido, De Souza y González

(2001) clasificaron a los modelos, según su propósito y el grado de extracción de la realidad (Cuadro 1).

Otra clasificación es con base a las capacidades de representar la dinámica y control de los componentes e interacciones del sistema (Quinteros *et al.*, 2006), de esta manera los modelos son: 1) estáticos, cuando se representa un sistema en un solo instante de tiempo en particular, o bien para representar un sistema en donde el tiempo no es importante, por ejemplo, simulación Montecarlo; 2) dinámicos, representan sistemas en los que las variables son funciones del tiempo, permitiendo predecir su desarrollo en un periodo dado; este tipo de modelos es de gran importancia para representar procesos biológicos; 3) determinísticos, no consideran la variación estocástica, comportándose de manera probabilística, los datos de entrada y las relaciones existentes en el sistema son especificados al inicio, es decir, no influye el azar en los resultados; y 4) estocásticos, la modelación se realiza considerando que al menos una de las variables que definen el comportamiento del sistema se muestra aleatoria, y entonces el resultado es al menos en parte variable.

Sin embargo, los modelos lineales o estáticos, no describen la dinámica de los procesos biológicos y físicos que ocurren en el sistema, y en los resultados no se incluye sus efectos e interacciones. Mientras que los modelos dinámicos, representan los procesos que se desarrollan en un sistema a través del tiempo y los

integra en la representación de su comportamiento. También proporcionan una herramienta para evaluar los sistemas de producción más completa y adaptable a diferentes condiciones, por integrar todos los procesos como variables (Rotz *et al.*, 2005a)

Importancia del uso de modelos en la agricultura

Según Gormley y Sinclair (2003), en el desarrollo de la ciencia se han diseñado y aplicado modelos durante siglos en diferentes disciplinas; sin embargo, los relacionados con los procesos agrícolas y ambientales se han implementado en las últimas décadas. Esto obedece a que en diferentes situaciones es más fácil trabajar con los modelos que con los sistemas reales, ya sea porque el sistema es demasiado grande y complejo, por limitación de recursos humanos y económicos, o por la imposibilidad de experimentar en dichos sistemas. Es por esto que en la investigación y planificación agrícola el desarrollo de modelos para simular diferentes procesos relacionados con su eficiencia, se ha convertido en una práctica común que, sustentada con la información científica disponible, es útil para pronosticar resultados en situaciones y condiciones específicas; lo que permite plantear nuevas hipótesis y orientar la investigación o el manejo hacia los puntos más críticos.

Cuadro 1. Tipos de modelo por su función y grado de extracción del fenómeno

Tipo	Característica
Por su propósito	
Descriptivos	Describe las características del fenómeno en cuestión; emplea la observación sistemática y participante, encuestas, entrevistas, estudios etnográficos, entre otros.
Explicativos	Busca conocer las causas que originan un fenómeno. Llega a generalizaciones extensibles más allá de los sujetos analizados. Se basa en obtener muestras representativas de los sujetos, usa diseños experimentales para el control del experimento y el análisis de datos.
Predictivo	Se basa en datos anteriores y en técnicas específicas como regresión múltiple, procesos etnográficos, procesos estocásticos, simulación o análisis causal.
Por el grado de extracción de la realidad	
Físicos	Aparatos biomédicos y cabinas espaciales.
Escala	Prototipo de la célula y del sistema solar.
Analógicos	Se representa la propiedad del objeto real por una sustituida, que se comporta de manera similar; se usa en entrenamientos y ayuda para la instrucción.
Interactivos	Escenarios predefinidos y juegos.
De entrada y salida	Simulación de mercados y sistemas de procesos estocásticos.
Lógicos	Se basa en la formulación de hipótesis, puede expresarse en forma de enunciado condicional entre dos proposiciones, que pueden o no ser válidas.
Matemáticos	Se basa en formulas funcionales para explicar los fenómenos del mundo real, es el modelo de mayor abstracción.

Fuente: De Souza y González (2001)

El modelaje también se considera una buena opción para transferir conocimientos generados sobre diversas prácticas agrícolas en diferentes regiones, pues aunque el conocimiento no se transfiere directamente de una granja a otra, especialmente si se encuentran en ambientes diferentes, sí se puede usar para diseñar su manejo a través de la simulación (Rotz *et al.*, 2005a). También en la agricultura se puede emplear el modelaje cuando se pretende modificar un sistema que involucra numerosos componentes y relaciones y es importante contar con escenarios simulados, para experimentar los cambios antes de llevarlos a la práctica, especialmente cuando éstos involucran objetivos críticos, como la seguridad agroalimentaria, el manejo y conservación de recursos naturales, rentabilidad de los sistemas, entre otros. Además, la simulación es una herramienta que permite hacer una evaluación rápida y barata sobre el comportamiento de un sistema agrícola en un periodo largo de tiempo (Rotz *et al.*, 2005b).

Los modelos en agricultura se han usado desde hace 50 años; inicialmente para evaluar procesos individuales, como evapotranspiración, propiedades hidráulicas del suelo, crecimiento de las plantas o cultivos y el contenido de nutrientes del suelo en los años 60's. Posteriormente, en los años 80's, para evaluar sistemas de pastoreo, movilización de nutrientes en sistemas de cultivo, erosión (Williams *et al.*, 1984) y productividad del suelo (Hernández y Ruiz, 1996), crecimiento de cultivos anuales (Holmann y Estrada, 1997), producción de cultivos, contaminación de agua (Arumí *et al.*, _____, López *et al.*, 2006), ciclos de nutrientes y la dinámica de la materia orgánica en suelos (Bowen y Jaramillo, 2001). Finalmente, a partir de los años 90's aparecen modelos que bajo el enfoque de agroecosistemas integran los componentes del sistema de manera multi o interdisciplinaria, para evaluar impacto de la política agrícola sobre la degradación del suelo, impacto ambiental y rentabilidad económica de sistemas agrícolas alternativos, impacto de la economía y política regional sobre la agricultura, efecto de políticas de manejo sobre emisiones de minerales en agricultura y la evaluación de pesticidas y fertilizantes sobre el suelo y el clima (Belcher *et al.*, 2004). En particular se han modelado los factores que intervienen en el cambio de uso de suelo, con prácticas agrícolas como componente principal, desde una visión espacial, económica, socioeconómico y política (Sandoval y Oyurzun, 2003).

En algunas disciplinas del conocimiento y en la toma de decisiones, se usan los modelos de simulación, justificado principalmente cuando la operación de las estrategias propuestas o la experimentación son costosas, riesgosas o se duda de su practicidad. En el caso de la agricultura, por ser una actividad desarrollada con base en el manejo de los recursos

naturales que son susceptibles al deterioro, la inestabilidad económica y por su indiscutible trascendencia en la seguridad alimentaria, es importante prever la pertinencia de las decisiones de cambio. Por ejemplo, es útil disponer de escenarios del efecto del uso de tecnologías novedosas, pues si bien el conocimiento es universal, las regiones agrícolas del mundo, en las cuales se genera, presentan contrastes, y un conocimiento aplicable a una región puede no serlo en otra y tener resultados negativos. De esta manera la simulación es una forma de evaluación previa del cambio, con los inherentes errores ocasionado por la simplificación propia de este ejercicio; aunque la mayoría de los modelos empleados en agricultura cuando se comparan con datos reales muestran un aceptable desempeño, como es el caso de Castellano *et al.* (2007), quienes obtuvieron resultados predichos similares a los valores reales cuando modelaron diferentes alternativas prácticas con diferentes sistemas de manejo. Por su parte Holmann (2000), reporta un modelo que tiene la capacidad de analizar en forma práctica y flexible las actividades agropecuarias encontradas en una cuenca o región, que además facilita el análisis ex-ante de nuevas alternativas tecnológicas para determinar su viabilidad económica y biológica.

También debe mencionarse que se pueden obtener resultados erróneos al elaborar los modelos, principalmente por errores en la introducción de la información, falta de experiencia del modelador o por una inapropiada simplificación de los procesos durante el desarrollo del modelo (Huang *et al.*, 2008). Por lo que es importante validar el modelo, es decir, comprobar que tenga la capacidad de representar adecuadamente a los componentes e interacciones del sistema real. Sin embargo, debe considerarse que no se llega a tener una representación total del sistema, solo de alguno o algunos de sus procesos (Orestes *et al.*, 1994).

Algunos modelos desarrollados para evaluar sistemas de cultivos agrícolas

El desarrollo de modelos para la representación de sistemas de cultivos se ha realizado a lo largo de los años para representar y evaluar diferentes procesos y bajo diferentes enfoques y disciplinas. A continuación se presenta una descripción de trabajos en orden cronológico, realizados en los últimos 20 años por diferentes autores en distintas regiones del mundo.

El desarrollo de modelos para la representación de sistemas de cultivos se ha realizado a lo largo de los años para representar y evaluar diferentes procesos y bajo diferentes enfoques y disciplinas. A continuación se presenta una descripción de trabajos en orden cronológico, realizados en los últimos 20 años por diferentes autores en distintas regiones del mundo.

En Toledo, España, Ortega *et al.* (1999) al utilizar modelos de simulación para evaluar escenarios de optimización del uso de agua de riego en diferentes cultivos crearon tres submodelos; el primero determinó las necesidades de agua de los cultivos, el segundo estableció un programa de riegos considerando las necesidades del cultivo, la evapotranspiración y la precipitación real, y el tercero estimó el rendimiento en función de las láminas netas de riego, considerando diferentes restricciones de evapotranspiración; el resultado fue un programa de manejo de riego para 16 diferentes cultivos a nivel regional. Por otro lado, Rodríguez y López (2000), obtuvieron mapas de recursos hídricos, energéticos y de operación para remodelar sistemas de riego y drenaje en sistemas de cultivo de arroz en Cuba, combinando modelos de simulación con un sistema de información geográfica, y lograron simular el riego en diferentes superficies, obteniendo el comportamiento hídrico, con lo que se pudieron diseñar terrazas arroceras.

Por su parte, Gutiérrez *et al.* (2002) utilizaron modelos de simulación para obtener escenarios referentes a los niveles de agua de acuífero del valle de Querétaro, México, en un periodo de 15 años (1995 a 2010); consideraron tres niveles de uso del agua por diferentes sectores –uso público urbano, agrícola e industrial–, y encontraron que el nivel de uso actual del agua llevará a la desaparición del patrón de cultivos, por lo que proponen acciones expresadas en uno de los escenarios considerados para revertir esta situación. Este es un claro ejemplo del uso de los modelos de simulación para la toma de decisiones a escalas regionales, acerca del uso de los recursos naturales.

La simulación también se ha empleado en la selección de material genético; Preciado *et al.* (2002), desarrollaron un modelo que permitió asistir en la selección de materiales de maíz de ciclo precoz adaptado en ambientes de secano con temporal, a través de la simulación del crecimiento de las plantas, con base en su desarrollo fisiológico originado por el efecto de los factores climáticos. Por su parte, Singels y De Janger (1991) utilizaron modelos de simulación para determinar las características óptimas de un genotipo de trigo, en diferentes tipos de climas y suelo.

Una herramienta más integradora es el paquete denominado Sistema de Apoyo para Decisiones para la Transferencia de Agrotecnología (DSSAT), que agrupa modelos de simulación de clima, suelo, agua y nutrientes, y permite simular el desarrollo de 16 cultivos en cualquier región, el efecto de su rotación a largo plazo y diferentes sistemas de manejo de los cultivos. Presenta cuatro niveles de simulación. En el primero, se asume que la disponibilidad de radiación, temperatura y el potencial genético son las limitantes

del desarrollo del cultivo; el agua y los nutrientes no limitan, es una estimación del rendimiento potencial. El segundo considera que el desarrollo del cultivo es limitado por la disponibilidad del agua, pero la disponibilidad de nutrientes no es limitante. En el tercero, la disponibilidad de nitrógeno representa una posible limitación. En el cuarto nivel se considera a la disponibilidad de fósforo, además de las restricciones de los niveles anteriores (Bowen y Jaramillo, 2001). Posee una herramienta de procesamiento de datos climáticos y con modelos específicos para cada tipo de cultivo, los cuales son de fácil adquisición e interpretación, aunque requiere grandes cantidades de información de suelos tienen la capacidad de contar con una base de datos para estimar los datos faltantes. Por su parte Giraldo *et al.*, 2007 mencionan que el DSSAT es capaz de organizar y archivar bases de datos sobre clima, suelos, cultivos, experimentos y precios, simular producciones de cultivos en una o varias épocas en secuencia, también permite analizar resultados y representar simulaciones de manera gráfica; así como evaluar diferentes prácticas de manejo específicas a una explotación o parte de ella.

Sin embargo, los modelos de simulación de las características del suelo agrícola deben diseñarse en una amplia escala temporal y espacial, para entender mejor los procesos. A nivel regional, es necesario considerar los diferentes usos agrícolas del suelo, dado que los procesos desarrollados en un cultivo influyen en los cultivos contiguos; también es conveniente la representación tridimensional del relieve de suelo de la región. Temporalmente se requiere que abarque un número de años necesarios para brindar datos históricos del manejo de los suelos (Walter *et al.*, 2003). Más recientemente y considerando el discurso del cambio climático, Streck y Alberto (2006) usaron los modelos de simulación para crear escenarios del efecto de dicho cambio sobre la fracción de agua aprovechable del suelo en cultivos de trigo (*Triticum aestivum*), soya (*Glycine max*) y maíz (*Zea mays*), y encontraron que cuando incrementa la temperatura del aire, decrece la fracción de agua aprovechable, y este efecto es más evidente en los cultivos de soya y maíz que en el cultivo de trigo.

Combinando la experimentación en campo con el uso de modelos de simulación, Cory *et al.* (2006) evaluaron el efecto del tipo de labranza –convencional y de conservación– sobre la erosión hídrica del suelo en tierras de ladera con cultivos de trigo en invierno. Con la información recabada en campo, al igual que con datos del modelo, los sistemas con labranza de conservación presentaron menor erosión; sin embargo, los autores mencionan que el modelo no fue capaz de representar todos los procesos complejos observados en campo como fue la combinación de precipitación, congelación y descongelación intermitente de los

suelos, pendientes pronunciadas y practicas inadecuadas de manejo.

Para evaluar servicios ambientales hidrológicos a nivel cuenca, Pérez *et al.* (2006) proponen un modelo de simulación dinámico y complejo, que tiene la particularidad de hacer proyecciones en sistemas en los que no existe un monitoreo permanente de datos. Este tipo de modelación se puede utilizar para desarrollar políticas de manejo del agua a nivel cuenca, relacionando los diferentes usos del recurso, entre los que destaca el agrícola, por su importancia socioeconómica.

Para simular sistemáticamente la rotación de cultivos de manera estocástica, en periodos específicos de un año y considerando el cultivo del año anterior, Castellazzi *et al.* (2008) proponen un modelo matemático que pronostica en un periodo largo de tiempo los efectos de la rotación de los cultivos sobre el cambio climático y la economía, además tiene la capacidad de considerar otras variables externas. Otros autores con anterioridad han usado la modelación en el desarrollo de rotaciones de cultivos (Dogliotti *et al.*, 2003; Rounsevell *et al.*, 2003; Stöckle *et al.*, 2003; Bachinger y Zander, 2006). Aunque usaron la técnica de optimización matemática de programación lineal para obtener rotaciones que ayudan en la planificación de la producción agrícola, estos modelos explican, optimizan o predicen las rotaciones de cultivos cuando se fijan restricciones de carácter biológico, económico u otras. Sin embargo, asumen que la única limitante es la restricción establecida, lo cual no sucede en la realidad, en donde hay una interacción de diferentes condicionantes, para lo cual una opción viable seria el uso de modelos de simulación basados en la dinámica de sistemas, que tiene la capacidad de representar procesos complejos con múltiples variables interactuando entre si.

El modelaje se ha implementado con éxito en diferentes sistemas de cultivo con distintos niveles de tecnificación como maíz, soya, arroz, frijol, praderas, entre otros. También es útil para evaluar la sustentabilidad en sistemas de subsistencia localizados en lugares frágiles como laderas, que pueden generar diversos procesos de degradación ambiental. Sin embargo, por las características propias de estos sistemas, como la diversificación de cultivos en tiempo y espacio, la itinerancia y el uso de implementos manuales, los modelos convencionales para predicción de cultivos no logran representar su condición, por lo cual los modelos diseñados deben ser capaces de evaluar estos sistemas, tratando de hacerlos sencillos y de que operen con información fácil de conseguir (Silva y Puche, 2001).

La representación y explicación de los sistemas agrícolas a través del uso de modelos de simulación

puede ser tan eficiente y adecuada como las capacidades y conocimientos del modelador lo permitan. En este sentido, es adecuado conformar equipos de trabajo de diferentes disciplinas y con diferentes habilidades, pues las relaciones y procesos en el interior del sistema responden a la interacción entre los subsistemas, y como son de diferente naturaleza se requiere de la interacción entre disciplinas para comprender el mayor número de ellos. Así mismo, es necesario prestar especial atención en la síntesis de la información para el cumplimiento de los objetivos del modelo.

Algunos modelos desarrollados para evaluar sistemas pecuarios

En los sistemas de producción ganadera también se han usado modelos. Algunos estudian o describen las relaciones biológicas para conocer el comportamiento fisiológico de un animal, y se les denomina mecanísticos (France y Thornley, 1984; Bind, 2003); otros integran todos o algunos elementos del sistema general, para representar su funcionamiento. También pueden simular las decisiones del manejo de los sistemas pecuarios, con lo que se obtiene información del comportamiento de dicho sistema de acuerdo al manejo integrado del pastoreo del ganado y cultivos, con especial énfasis en el manejo del agua, nutrientes y pesticidas (Ascough *et al.*, 2001). En estos modelos se ha incorporado la evaluación del ciclo de los nutrientes, el impacto ambiental de las prácticas de manejo empleadas en el sistema y el efecto de políticas de producción, comercio, ambientales, entre otras, en su desarrollo. Pomar *et al.* (1991) desarrollaron un modelo discreto y estocástico de simulación, para sistemas de producción de cerdos, el cual representa la dinámica reproductiva de la piara, considerando parámetros genéticos de los animales, composición de la dieta y prácticas de manejo implementadas. En esta misma década bajo una visión exclusivamente económica y productivista, Pannell (1995) evaluó índices económicos y de producción en un sistema de cría de ovinos, usando modelos de simulación.

En fincas ganaderas, Holmann (2000) utilizó un modelo de simulación, integrado por cinco submodelos, para predecir escenarios futuros, según diferentes estrategias de manejo forrajero; consideró factores claves como el costo de producción de leche, inversión requerida por cada estrategia, viabilidad de obtener y pagar el crédito, y porcentaje del área en pasturas liberada para usos alternativos. Este programa consiste únicamente en una hoja de cálculo, en donde se introducen restricciones a los diferentes factores. También permite analizar las actividades agropecuarias en forma práctica y flexible, a nivel de una cuenca o región, y facilita el análisis ex-ante de nuevas alternativas tecnológicas para determinar su viabilidad tanto biológica como económica,

permitiendo conocer las condiciones necesarias para promover su uso en una determinada región.

Los cinco modelos empleados para representar y evaluar actividades ganaderas desarrollados por Holmann (2000) son: 1) TAMU–Beef, predice el nivel de productividad (ganancia de peso) de diferentes categorías de animales dentro de un hato productor de carne, considerando el potencial genético o como respuesta al tipo de la alimentación disponible; 2) JAVA/PC–Herd, desarrollado para el trópico, es un modelo simple que pide los requisitos de mantenimiento y ganancia de peso o producción de leche deseada, y lo compara contra la oferta de energía en la dieta, según una función de consumo voluntario seleccionada por el usuario; 3) CNCPS, predice la producción de leche o ganancia de peso, con base al flujo neto de carbohidratos y proteína disponible en la dieta, y contiene una lista de alimentos y forrajes para escoger el más parecido al utilizado; 4) GRAZFEED, predice la producción de leche, carne o lana con base en la oferta de nutrientes en la dieta, en hatos y rebaños mantenidos en pastoreo; y 5) EDINBURGH, es un modelo general de sistemas de producción de bovinos diseñado en forma modular, que integra producción de pasturas con respuesta animal en submodelos que pueden usarse en forma individual, y predice la producción de leche o carne tanto a nivel individual (por vaca) como de hato. Otro uso importante del modelaje en la ganadería es el que puede darse en salud animal, para modelar epidemias simples de forma determinista y estocástica, calcular la tasa de contacto e infección, y simular el desarrollo de estas epidemias en diferentes niveles geográficos (Chamorro, 2002). Esto tiene especial importancia para la planificación de campañas de salud animal ante la amenaza de diseminaciones masivas de enfermedades infecciosas.

Para obtener estimaciones biológicas en estudios del sistema ruminal de bovinos, Vargas *et al.* (2004) proponen el modelo mecanístico Turix v1.0, el cual consta de ciertas suposiciones en cuanto al alimento, al funcionamiento del rumen y su variabilidad; se compone de 11 variables y tres submodelos: de degradación del alimento, del crecimiento bacteriano y de la fermentación microbiana. Con base en las pruebas de ajuste realizadas, se determinó que dicho modelo es una herramienta confiable para obtener información biológica en un sistema ruminal cerrado. Por su parte, Rotz *et al.* (2005a) desarrollaron un modelo complejo y dinámico de simulación del ciclo de nitrógeno (N) en suelos ganaderos, considerando componentes de entrada, como el aporte de N orgánico de la fauna edáfica, el N fijado por herbáceas y por las heces del ganado, el N inorgánico de fertilizantes, N fijado de la atmósfera y por orina del ganado, y componentes de salida, como productos de la ganadería y de herbáceas, amonio producido por

herbáceas y oxidación y lixiviación de N inorgánico. Además, el modelo contempló la transformación de N inorgánico a orgánico, dentro del sistema. Por otra parte, Castellaro *et al.* (2006) utilizaron modelos matemáticos para representar la relación entre factores intrínsecos de ovinos, como el consumo, ganancia de peso y uso de suplemento, y factores de la pradera, como el balance hídrico, crecimiento y senescencia del forraje; posteriormente simulaban dinámicamente diferentes alternativas del uso de los componentes, con lo que obtuvieron diversas opciones para manejar el sistema. Los resultados fueron una buena predicción ($p < 0.05$) con respecto a datos experimentales, lo que indicó la validez del uso de modelos para representar los sistemas ganaderos a base de pastoreo.

Un modelo del crecimiento, fenología y balance hídrico en praderas anuales de clima mediterráneo fue implementado por Castellaro y Squella (2006), considerando como variables las condiciones climáticas, la disponibilidad de material fotosintético y la humedad del suelo. Este modelo fue capaz de explicar el 90% de la variación de los valores observados en la acumulación de materia seca y la humedad del suelo. Los mismos autores proponen que, dada la compleja naturaleza del sistema suelo-planta-clima-animal, el uso de modelos de simulación es una herramienta útil para evaluar manejos alternativos de praderas, en distintos ambientes edafoclimáticos. Castellaro *et al.* (2007) simulaban la ganancia de peso en bovinos de diferentes razas en un sistema de producción de carne y con distintos manejos de pradera, tipo de pastoreo, densidades de carga, estrategias de suplementación y precios de insumos, con el objetivo de evaluar diferentes alternativas de manejo general del sistema. Sin embargo, aunque se reportó al menos una estrategia adecuada de manejo con base a los resultados del modelo, no se obtuvieron resultados reales aceptables al aplicar el manejo en el sistema.

Los resultados anteriores muestran que la complejidad de los modelos ha aumentado con el paso de los años, y que se ha tratado de hacer una representación más completa de los sistemas modelados mediante la integración multivariable en un enfoque sistémico. Esto puede deberse a tres razones separadas o combinadas, que son la interacción de las diferentes disciplinas del conocimiento (interdisciplina), un incremento en el conocimiento y experiencia sobre la modelación, y el avance en la tecnología del manejo de información. Actualmente existen en el mercado programas computacionales que permiten modelar sistemas complejos y dinámicos con relativa facilidad y a gran velocidad, algunos ejemplos son Vensim® PLE (Ventana Systems, Inc., 2010), Stella (Isee systems, 2010), Powersim (Powersim Software A. S., 2010) y Simile (Simulistics, 2003), entre otros.

Los modelos y el enfoque en agroecosistemas

Enfocando los modelos a los agroecosistemas se estudia y planea la agricultura, logrando una interrelación entre la agronomía, la ecología y la teoría de sistemas; además, se busca entender a los sistemas de producción con base en las interacciones entre sus componentes a diferentes escalas geográficas. Los componentes del agroecosistema son biológicos (recursos naturales en su totalidad), sociales, políticos, económicos y humanos. Los objetivos productivos y de conservación de los recursos son claves en estos sistemas. Dentro de la modelación también ha permeado el enfoque agroecosistémico, y algunos modelos reportados bajo este enfoque se mencionan a continuación.

Para crear un modelo de simulación del crecimiento de diferentes cultivos, Denizov (2001) sistematizó la información experimental generada en un instituto de investigación agrícola de Lituania. Este complejo modelo, llamado Dialog Simulator and Predictor for Research in Agriculture (DIASPORA), integra conocimientos de diferentes disciplinas para un mejor entendimiento y representación de los agroecosistemas en la relación agua-suelo-atmósfera; cuenta también con modelos simplificados para aplicaciones ya determinadas. Por su parte, Franco y Mirschel (2001) hacen una simulación de procesos complejos, representando el desarrollo de los cultivos y la dinámica de nutrientes en el suelo, con el modelo de crecimiento de cultivos AGROSIM-ZR (Agroecosystem Simulation- Sugarbeet ZR), que también modela procesos edáficos basados en el manejo agrícola. Para evaluar la sustentabilidad de los agroecosistemas, Belcher *et al.* (2004) proponen el uso del modelo de simulación SAM (Sustainable Agroecosystem Model), que incluye los submodelos económico y ambiental, y recomiendan la simulación como una herramienta útil para evaluar la sustentabilidad a largo plazo; sin embargo, mencionan que los resultados varían de acuerdo a los indicadores utilizados, pues las diferentes decisiones originan mayores o menores cambios sobre el agroecosistema. Utilizando este mismo modelo e integrando un modelo económico que simula las decisiones de uso del suelo, más un modelo de crecimiento de cultivos y de calidad del suelo, Belcher *et al.* (2004) evaluaron la sostenibilidad de agroecosistemas, obteniendo indicadores económicos (ganancia o beneficio y riesgo) y de suelo (contenido de materia orgánica, rendimiento de los cultivos y pérdida de carbono) proyectados en el tiempo.

Con el fin de modelar cómo los valores humanos influyen a través de las decisiones de manejo sobre el cambio del uso del territorio de una región, Acevedo *et al.* (2007) utilizaron modelos para simular la interacción humano-ambiental, bajo el enfoque de

biocomplejidad, que es la relación de los sistemas humanos con los naturales. También bajo este enfoque, Martínez y Esteve (2007) simularon factores ambientales y socioeconómicos que controlan la exportación de nutrientes a una laguna, consideraron la dinámica del N y fósforo, cambios de uso de suelo, papel de los humedales litorales en la retención y eliminación de los nutrientes que llegan desde la cuenca, la dinámica poblacional y la entrada de nutrientes procedentes del medio urbano.

Sin duda es importante conocer el ciclo de carbono en agroecosistemas de cultivos por ser la principal fuente de energía de los microorganismos edáficos, uno de los principales responsables de la fertilidad del suelo (Álvarez y Biancucci, 2006; Julca *et al.*, 2006), particularmente cuando se logra conocer a nivel región. En este sentido, se desarrolló el modelo Agro-C, que permite simular el ciclo del carbono en agroecosistemas, y que consta de los submodelos de carbono del cultivo y carbono del suelo. Además, predice la circulación del carbono con base en la simulación de la fotosíntesis del cultivo, la respiración autótrófica y la producción primaria neta. Este modelo puede aplicarse a áreas con diferentes características de clima, suelo, rotación de cultivos y prácticas agrícolas (Huang *et al.*, 2008).

Aunque la inclusión de las diferentes dimensiones que afectan el desarrollo de los agroecosistemas (económica, ambiental, social, humana y cultural, entre otras) en un modelo de simulación trata de describir de manera integrada su funcionamiento, puede existir cierta incompatibilidad en los resultados. Es decir, una práctica con mejores resultados económicos puede ocasionar un conflicto social o ecológico. Por tal razón, es importante obtener un resultado final global, que otorgue a cada dimensión un nivel jerárquico de importancia, acorde con la situación real del sistema que se pretende modificar. Por ejemplo, si se trata de una región en donde existen diferencias culturales dentro de la población, la dimensión social es más importante, dado que puede limitar el buen funcionamiento del sistema.

Modelaje participativo

Aunque la investigación participativa se ha llevado a cabo desde hace varias décadas en la agricultura, con la finalidad de que los beneficiarios se apropien de su realidad y se vuelvan gestores de su propio desarrollo, en los procesos de modelación de sistemas agrícolas este enfoque de investigación apenas comienza a considerarse. Al respecto, Matthews *et al.* (2000), mencionan que aunque muchos modelos han sido útiles para los investigadores que los elaboraron, pocos han sido utilizados para apoyar el desarrollo de políticas o para mejorar la toma de decisiones. Por esta razón Gormley y Sinclair (2003) sostienen que es

esencial consultar a los actores involucrados, durante todas las etapas de desarrollo del modelo, para mejorar el resultado de los modelos sobre manejo de recursos naturales como una herramienta en la toma de decisiones. Sin embargo, en la literatura existen pocos estudios reportados que abordan el modelaje participativo. Así, uno de los pocos trabajos de este tipo es el desarrollado por Gormley y Sinclair (2003) en Costa Rica, en donde propusieron un modelo de manejo agrícola, considerando la participación de los productores dentro del proceso de modelaje, con el objetivo de rescatar el conocimiento local del manejo de los recursos naturales y como herramienta auxiliar en la toma de decisiones de los participantes. En dicha propuesta examinaron la función de los árboles sobre la biodiversidad y productividad de las fincas, y como un nuevo enfoque para relacionar las actividades humanas con la conservación de los recursos naturales.

Por lo tanto, bajo el enfoque que se ha dado a los modelos para representar a la agricultura, como sus procesos de aplicación han evolucionado en el tiempo, al incremento de los elementos considerados, y al tipo de intervención de los diferentes actores en la modelación, se identificaron tres etapas en el desarrollo de la modelación (Figura 2). En la primera, el modelador (científico) considera únicamente los componentes físicos y biológicos; en la segunda, se considera además el componente humano como tomador de decisiones, y los diferentes aspectos externos que influyen en el proceso, pero el productor sigue siendo un elemento de estudio; finalmente en la tercera, el productor o manejador del sistema se ubica junto al modelador y entre ambos modelan los elementos del sistema agrícola. Este último funciona bajo un enfoque participativo, en donde el productor se involucra en el proceso de diseño-evaluación y rediseño de los sistemas de producción.

En las investigaciones y planeaciones del manejo de los recursos naturales es necesaria la participación de los productores, quienes hacen uso directo de los recursos, por ser ellos quienes toman y seguirán tomando la decisión de su manejo, ya que resulta de poca utilidad realizar simulaciones del manejo de los sistemas de producción con excelentes prácticas de manejo que quizá nadie realice en realidad, ya sea por su desconocimiento o por falta de interés. En cambio, al involucrar a los tomadores de decisiones (productores) en el proceso de modelaje se gana por un lado el interés de su uso y por otro el aporte de conocimiento local más factible de practicarse, mismo que se complementa con conocimiento técnico de los especialistas. Sin embargo, en esta etapa de modelación participativa surgen algunos retos nuevos. Para que el proceso del modelaje pueda implementarse con éxito con los responsables de los sistemas de producción agrícola, es necesario explicar claramente la importancia y los beneficios prácticos de su uso,

además, los modelos utilizados deben ser fáciles de interpretar y permitir hacer comparaciones entre los diferentes escenarios que se planteen en conjunto (Gormley y Sinclair, 2003).

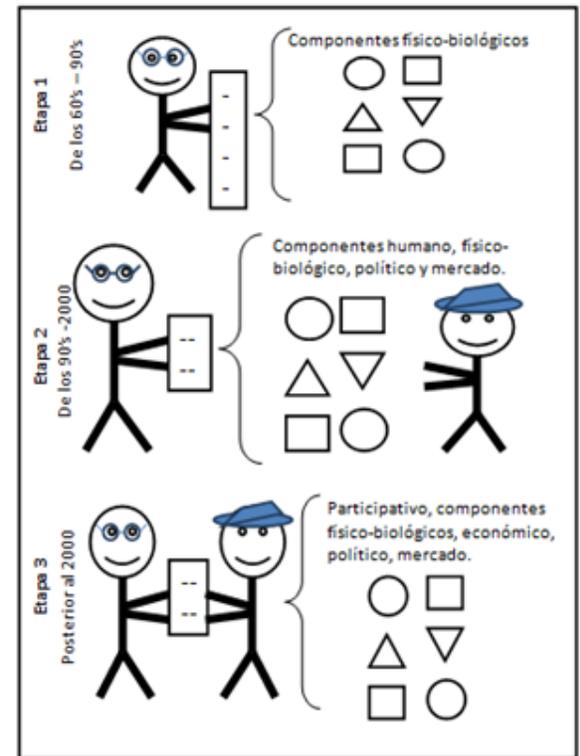


Figura 2. Evolución de la visión al aplicar modelos en agricultura

También es necesario considerar que el rediseño de los sistemas debe ser un proceso a largo plazo, por lo tanto, las modificaciones a proponer deben ser paulatinas, pues cambios radicales lejos de propiciar interés por parte de los productores pueden ocasionar su desaliento y preocupación, o un rechazo a implementar cualquier cambio.

CONCLUSIONES

El modelaje desempeña una función importante en la investigación y planificación de manejo de los sistemas de producción agropecuaria. Sin embargo, al igual que los paradigmas científicos y las herramientas empleadas para la evaluación de estos sistemas, la manera de realizar los modelos ha evolucionado, pasando de la simplicidad de relaciones causales lineales bi-variables al uso de modelos complejos sistémicos y dinámicos.

Los modelos de simulación debidamente evaluados y validados mejoran la eficiencia en los procesos de

investigación, transferencia de tecnología y desarrollo agrícola, al permitir extrapolar resultados a otras localidades con similares características y obtener posibles escenarios del funcionamiento del sistema con la innovación sugerida, lo que permite de cierta forma, hacer una evaluación antes de implementarla en el sistema real, esto es especialmente importante para hacer eficiente el uso y manejo de los recursos naturales, humanos y económicos. Además los modelos deben ser fáciles de interpretar y usar, para lograr su aceptación y uso por diferentes actores involucrados en la agricultura en distintas localizaciones. El trabajo interdisciplinario es necesario cuando se pretende representar sistemas agrícolas a través de modelos dinámicos, dado que su funcionamiento general, es el resultado de diferentes procesos desarrollados dentro y fuera del sistema; el solo hecho de identificarlos adecuadamente constituye ya un reto, que incrementa su dificultad, cuando además se pretende recrearlos y relacionarlos como en el sistema real.

REFERENCIAS

- Acevedo, M. F., Rosales, J., Delgado, L., Ablan, M., Davila, J., Callicot, J. B. y M. Monticino. 2007. Modelos de interacción humano-ambiental: el enfoque de la biocomplejidad. *Ecosistemas*, 16. www.revistaecosistemas.net. 29 Septiembre 2008
- Álvarez, A. P. y Biancucci, M. 2006. Ciclo del carbono: materia orgánica y humus. Universidad Nacional de Comahue, Argentina. www.essa.uncoma.edu.ar/academica/materias/microbiologia_ambiental/informes_seminarios_2006/8_materia-organica-y-humus.pdf. 25 Julio 2010
- Arumí, J. L., Martin, D. L. y D. G. Watts. _____. Modelación del impacto de prácticas de manejo agrícola en las aguas subterráneas. <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/encuen/model.pdf>
- Ascough, J. C., Shaffer, M. J., Hoag, D. L., McMaster, G. S., Dunn, G. H., Ahuja, L. R. and M. A. Weltz. 2001. GPFARM: an integrated decision support system for sustainable Great Plains agricultural. *In*: D. E. Stott (ed). *Sustaining the global farm*. p. 951-960 <http://tucson.Ars.ag.gov/isco/isco10/table%20of%20contents.pdf>. 20 Septiembre 2008
- Bachinger, J. and P. Zander. 2006. ROTOR, a tool for generating and evaluating crop rotations for organic farming systems. *European Journal of Agronomy*, 26: 130-143.
- Belcher, K. W., Boehm, M. M. and M. E. Fulton. 2004. Agroecosystem sustainability: a system simulation model approach. *Agricultural Systems*, 79:225-24.
- Bind, M. 2003. Instrumentos para el monitoreo del impacto ambiental sobre la producción agrícola. Documento del diplomado Di scienze agronomiche e gestione del territorio agroforestale. Universidad degli Studi di Firenze. 13 p.
- Bowen, W. y R. Jaramillo. 2001. Modelos de dinámica de nutrientes en el suelo y en la planta. *En*: Congreso Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo [CD-ROM archivo]. Quito, Ecuador.
- Castellaro, G. G., Gompertz, G., Aguilar, C., Vera, R. y R. Allende. 2006. Interacción de dos modelos de simulación para la evaluación de sistemas de producción ovina en el secano mediterráneo de Chile. *Ciencia e Investigación Agraria*, 33: 47-56.
- Castellaro, G. G., Klee, G. G. y R. J. Chavarría. 2007. Un modelo de simulación de sistemas de engorda de bovinos a pastoreo. *Agricultura Técnica*, 67: 163-172.
- Castellaro, G. T. y N. F. Squella. 2006. Modelo simple de simulación para la estimación del crecimiento, fenología y balance hídrico de praderas anuales de clima Mediterráneo. *Agricultura Técnica*, 66: 271-282.
- Castellazzi, M. S., Wood, G. A., Burgess, P. J., Morris, J., Conrad, K. F. and J. N. Perry. 2008. A systematic representation of crop rotations. *Agricultural Systems*, 97:26-33.
- Chamorro, G. A. 2002. Modelación matemática de epidemias simples. *Revista de la Facultad Nacional de Salud Pública*, 20(1):161-183.
- Cory, G. R., Wu, Q. J., Singh, P. and K. D. McCool. 2006. WEPP simulation of observed winter runoff and erosion in the U.S. Pacific Northwest. *Vadose Zone Journal*, 5:261-272.
- De Souza, L. R. y D. O. González. 2001. Modelo de desarrollo sustentable en una comunidad rural. Grupo para promover la educación y el desarrollo rural A.C. México, D.F.
- Denisov, V. V. 2001. Development of the crop simulation system DIASPORA. *Agronomy Journal*, 93:660-666.

- Dogliotti, S., Rossing, W. A. H. and M. K. Van Ittersum. 2003. ROTAT, a tool for systematically generating crop rotations. *European Journal of Agronomy*, 19(2): 239–250.
- France, J. and J. H. M. Thornley. 1984. *Mathematical models in agriculture*. 1st Ed. Butterword & Co. Ltd. United Kingdom.
- Franco, U. and W. Mirschel. 2001. Integration of a crop growth model with a model of soil dynamics. *Agronomic Journal*, 93: 666-670.
- García, J. M. 2008. *Teoría y ejercicios prácticos de Dinámica de Sistemas*. Fundación Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Cataluña, España. 84 p.
- García, J. M. 2004. *Sysware*. Barcelona, España. ISBN 84-609-2462-9. 315 p.
- Giraldo, L. M., Lizcano, L. J., Gijsman, A.J., Rivera, B. y L. H. Franco. 2007. Adaptación del modelo DSSAT para simular la producción de *Brachiaria decumbens*. *Pasturas Tropicales*, 20: 2-12.
- Gormley, H. L. L. y L. F. Sinclair. 2003. Modelaje participativo del impacto de los árboles en la productividad de las fincas y la biodiversidad regional en paisajes fragmentados en América Latina. *Agroforestaría en las Américas*, 10: 103-108.
- Gutiérrez, C. N., Palacios, V. E., Peña, D. S. y V. O. L. Palacios. 2002. Escenarios para el aprovechamiento del acuífero del Valle de Querétaro. *Agrociencia*, 36:1-10.
- Hernández, G. y Ruiz, A. Modelaje de la erosión de suelos en Costa Rica mediante el modelo WEPP. En: X Congreso Nacional Agronómico y II Congreso de Suelos http://www.mag.go.cr/congreso_agronomico_x/a50-2388-III_231.pdf
- Holmann, F. 2000. 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: XVI Reunión Latinoamericana de Producción Animal (ALPA)*. Montevideo, Uruguay. 24 p.
- Holmann, F. y R. D. Estrada. 1997. Alternativas en la Región Pacífico Central de Costa Rica: Un modelo de simulación aplicable a sistemas de doble propósito. *En: C. Lascano y F. Holmann*, eds. *Conceptos y metodologías de investigación en fincas con sistemas de producción de doble propósito*. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Publicación CIAT No. 296. Cali. 285 p.
- Huang, Y., Yu, Y., Zhang, W., Sun, W., Liu, S., Jiang, J., Wu, J., Yu, W., Wang, Y. and Z. Yang. 2008. Agro-C: A biogeophysical model for simulating the carbon budget of agroecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*. Artículo en prensa 10.1016/j.agrformet.2008.07.013. 20 Septiembre 2008
- Julca, O. A., Meneses, F. L., Blas, S. R. y A. S. Bello. 2006. La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *IDESIA Chile*, 24: 49-61.
- López, S. T., González, R. F., Dueñas, G., Cid, L. G., Sierra, J. y O. H. Lafontaine. 2006. Modelación del manejo óptimo del agua en suelos ferralíticos del sur de la Habana. *Revista de Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 15(4):37-47.
- Martínez, F. J. y S. M. A. Esteve. 2007. Gestión integrada de cuencas costeras: dinámica de los nutrientes en la cuenca del mar menor (sudeste de España). *Revista de Dinámica de Sistemas*, 3:2-23.
- Matthews, R., Stephens, W., Hess, T., Mason, T. and A. Graves. 2000. *Applications of crop/soil simulations models in developing countries*. Report PD. 82. Institute of Water and environment, Bedfordshire, UK. Cranfield University. 304 p.
- Medin, M. J. 2006. Función de la sistemodinamica en la universidad. Conferencia Magistral, Bayamón. <http://136.145.236.35/isdweb/Funcion-de-la-SD-en-la-Universidad.pdf> 6 de Octubre de 2010
- Orestes, N., Shrade, F. K. and K. Beliz. 1994. Verification, validation and confirmation on numerical models in the earth science. *Science*, 264:641-646.
- Ortega, J. F., De Juan, J. A., Tarjuelo, J. M., Merino, R. y M. Valiente. 1999. Modelo de optimización económica del manejo del agua de riego en las explotaciones agrícolas: aplicación de la agricultura de regadío de la provincia de Toledo. *Invest. Agricultura y Producción Vegetal*, 14: 325-354.
- Pannell, D. J. 1995. Economic aspects of legume management and legume research in dryland

- farming systems of southern Australia. *Agricultural Systems*, 49:217-236.
- Pérez, M. O., Delfín, C., Fregoso, A. y H. Cotler. 2006. Modelos de simulación para la elaboración y evaluación de los programas de servicios ambientales hídricos. *Gaceta Ecológica*, 78: 65-84.
- Pomar, C., Harris, L. D., Savoie, P. and F. Minvielle. 1991. Computer simulation model of swine production systems:III. A dynamic herd simulation model including reproduction. *Journal Animal Science*, 69: 2822-2836.
- Powersim Software A. S. 2010. Powersim. <http://www.powersim.no/> 25 enero 2011.
- Preciado, R. E., Erazo, M., Quijano, J. A., Terrón, A. y R. Paredes. 2002. Simulación del crecimiento de maíces precoces en condiciones de secano. *Agronomía Mesoamericana*, 13: 123-128.
- Quinteros, M., Alonso, A., Escudero, L., Guignard, M. y A. Weintraub. 2006. Una aplicación de programación estocástica en un problema de gestión forestal. *Revista Ingeniería de Sistemas*, 20: 67-95.
- Rodríguez, J. A. y G. López. 2000. Planificación de recursos para la modernización de los sistemas arroceros mediante el empleo de modelos de simulación y SIG. *Agr. Prot. Veg.*, 15:181-194
- Rotz, C. A., Buckmaster, D. R. and J. W. Comerford. 2005a. A beef herd model for simulating feed intake, animal performance, and manure excretion in farm system. *Journal Animal Science*, 83:231-242.
- Rotz, C. A., Taube, F., Russelle, M. P., Oenema, J., Sanderson, M. A. and M. Wachendorf. 2005b. Whole-farm perspectives of nutrient flows in grassland agriculture. *Crop Science*, 45: 2139-2159.
- Rounsevell, M. D. A., Annetts, J. E., Audsley, E., Mayr, T. and I. Reginster. 2003. Modelling the spatial distribution of agricultural land use at the regional scale. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 95: 465-479.
- Sandoval, V. y V. Oyarzun. 2003. Modelamiento y prognosis espacial del cambio en el uso del suelo. Quebracho. *Revista de Ciencias Forestales*, 11:9-21.
- Silva, O. y M. Puche. 2001. Uso de modelos de simulación para evaluar sistemas agrícolas de subsistencia en tierras de ladera. 2nd International Symposium Modelling Cropping Systems. Florencia, Italia. Sp.
- Simulistics, 2003. Simile. <http://www.simulistics.com>. 7 Octubre 2010
- Singels, A. and J. M. De Janger. 1991. Determination of optimum wheat cultivar characteristics using a growth model. *Agricultural Systems*, 37:25-38.
- Stella 2010. <http://www.iseesystems.com/software/Education/StellaSoftware.aspx>. 15 Octubre 2010.
- Stöckle, C. O., Donatelli, M. and R. Nelson. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*, 18:289-307.
- Streck, A. N. y M. C. Alberto. 2006. Simulacao do impacto da mudanca climática sobre a água disponível do solo em agroecossistemas de trigo, soja e milho em Santa Maria, RS. *Ciencia Rural*, 36: 424-433.
- Vargas, V. L., Ku, V. J., Vargas, V. F. y P. S. Medina. 2004. Modelo para la estimación de tres parámetros ruminales biológicos. *Interciencia*, 29: 296-302.
- Ventana Systems.2010. Vensim ® PLE. <http://www.vensim.com/cgi-bin/download.exe>. 7 Octubre 2010
- Walter, C., Rossel, V. R. A. and A. B. McBratney. 2003. Spatio-temporal simulation of the field-scale evolution of organic Carbon over the landscape. *Soil Science Society American Journal*, 67:1477-1486.
- Williams, J. R., Jones, C. A. y P. T. Dyke. 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and productivity. *Trans. ASAE*. 27: 129-144.