

MODELOS DE DINAMICA DE NUTRIENTES EN EL SUELO Y EN LA PLANTA

Walter Bowen* y Raúl Jaramillo*

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. Lo complicado e intrincado de la realidad ha contribuido a confundir, tanto a los responsables de tomar decisiones como a los científicos, esto ha resultado con frecuencia en una imposibilidad para definir claramente los problemas y buscar soluciones. Se ha logrado éxito al interior de algunas disciplinas específicas en el entendimiento de procesos y conceptos básicos, pero estos conocimientos dispersos no se han integrado y más aún, se ha avanzado muy poco en la generación de herramientas que permitan estimar las consecuencias del uso de tecnologías agrícolas en el medio ambiente o la productividad.

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 (Systems Analysis o Systems Research). Una parte de esta metodología, la cual es consecuencia de los avances tecnológicos de la computación y de 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 de los procesos del suelo, los modelos de sistemas sociales y económicos, los Sistemas de Información Geográfica (GIS), y los sistemas de manejo de base de datos. Cuando todos estos medios, basados en la computación, son usados para auxiliar a los responsables de tomar

decisiones, con frecuencia se les denomina Sistemas de Apoyo para la Toma de Decisiones.

Antecedentes sobre simulación de sistemas

Un sistema puede ser definido como un conjunto limitado de objetos y las interacciones que se presentan entre ellos. Un modelo no es más que la descripción de un sistema, a diario nosotros empleamos modelos conceptuales para nuestra comunicación, por ejemplo, cuando afirmamos que llueve o no, en realidad estamos usando un modelo verbal (conceptual) para definir un estado del sistema “clima” que nos rodea.

Un modelo matemático, generalmente con fines científicos o de administración, va más allá, su objetivo es cuantificar las relaciones e interacciones que se presentan al interior de un sistema, este tipo de modelos usualmente se presentan como un conjunto de ecuaciones en la forma de un programa de computadora. Los modelos computacionales del sistema suelo-cultivo-atmósfera pueden hacer una contribución valiosa en ambos: Profundizar en el entendimiento de los procesos que determinan la respuesta de un cultivo y mejorar nuestra habilidad para predecir el desempeño de un cultivo en diferentes áreas, bajo diferentes situaciones de manejo o de clima.

Una simple ilustración de como las actividades de experimentación y simulación pueden enlazarse se muestra en la figura 1. En la parte superior de la figura, se observa que nuestro modelo conceptual de un sistema de cultivo, nos provee con hipótesis que pueden ser probadas de modo experimental en el campo. Si se tiene la capacidad de describir nuestro modelo conceptual en términos cuantitativos, se puede entonces producir un modelo matemático que puede ser introducido en un programa de computadora y obtener así un estimado simulado. El modelo puede ser simple y describir solamente un proceso, o puede ser muy

* Centro Internacional de la Papa (CIP) y IFDC, Casilla 17-21-1977, Quito, Ecuador. Correo Electrónico: W.Bowen@cgiar.org y Jaramill@cip.org.ec.

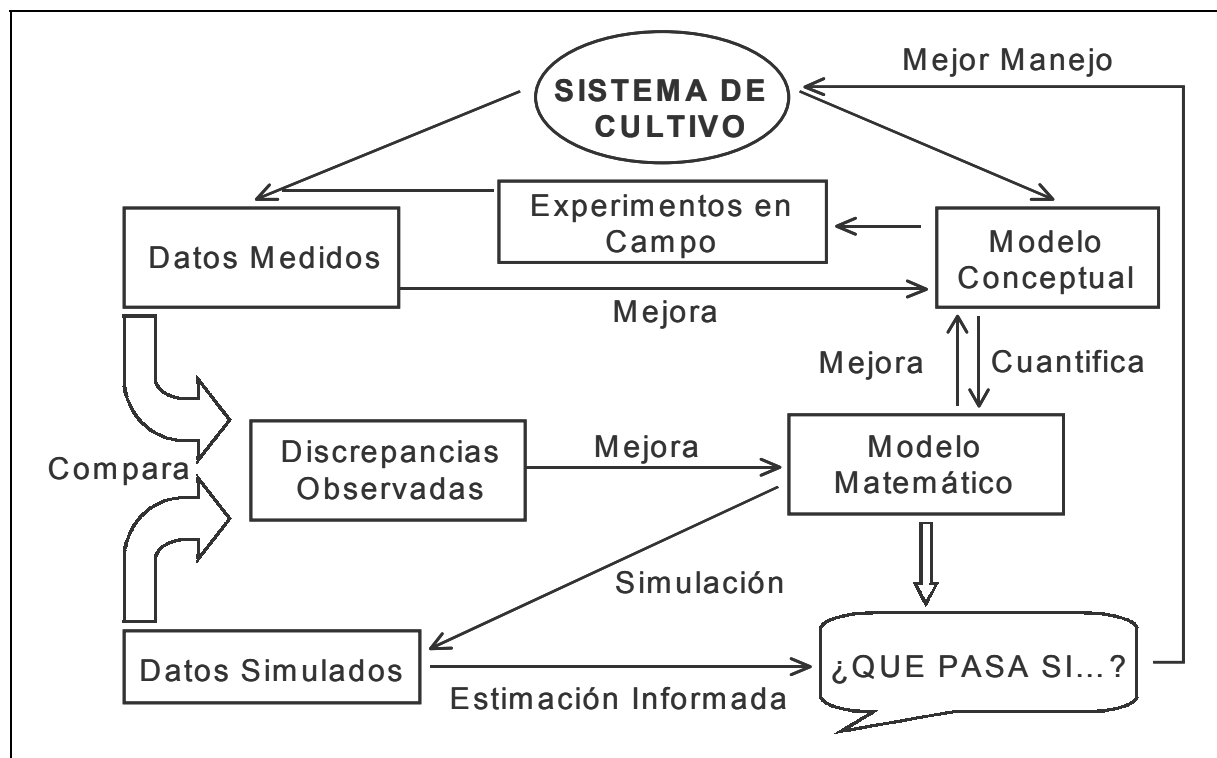


Figura 1. Esquema del proceso interactivo para el desarrollo y la validación de modelos apoyado en la información de experimentos de campo y su utilidad en el manejo de sistemas agrícolas (basado en Keen y Spain, 1992).

grande, compuesto de numerosas ecuaciones que presentan la interacción de varios procesos, tales como la fotosíntesis, fenología, partición del carbón, disponibilidad de agua del suelo, y el crecimiento y desarrollo de la planta en función de los déficits de agua y de nitrógeno.

Independientemente de la complejidad del modelo, es siempre posible comparar los resultados simulado con datos medidos, y determinar que tan correctamente el modelo imita la realidad. Cuando existen discrepancias con los datos medidos y simulado, se debe determinar el porqué, lo cual puede involucrar experimentación futura y refinamiento subsecuente del modelo conceptual y matemático. Este proceso representa un ciclo clásico de investigación, pensado no solamente en mejorar nuestro entendimiento, sino también en proveer de modelos dinámicos que nos apoyen en la toma de decisiones.

Una vez que se tiene un modelo suficientemente probado, se tiene entonces una herramienta poderosa de análisis, la cual permite evaluar diferentes estrategias de manejo, contestando a la pregunta ¿Qué pasa si....?. Por ejemplo, que

cultivares se desempeñan mejor en un sitio determinado, ¿Podemos ajustar las fechas de siembra y cosecha, para tomar ventaja de condiciones climáticas? ¿Como podemos optimizar el manejo del riego y la aplicación del nitrógeno, desde una perspectiva económica y de sostenibilidad?

Los objetivos primarios de un modelo en ciencia son tres: (i) mejorar nuestro *entendimiento* de un sistema o probar teorías científicas, (ii) *predecir* el resultado de una combinación de situaciones en un sistema o (iii) *controlar* el sistema estudiado y producir resultados anticipados. El proceso inicial de simulación empieza con la selección del acercamiento adecuado de modelaje, lo cual está en función de los objetivos y el tipo de usuario. Los modelos se han clasificado de distintas maneras, las cuales no se profundizan aquí (Addiscott, 1993).

Un aspecto práctico importante es si existe o no, la cantidad adecuada de datos para alimentar y evaluar un modelo. Maloszweski y Zuber (1992) mencionan que los modelos con una gran cantidad de parámetros generalmente proveen una mayor resolución de procesos complejos y

pareados, que aquellos modelos con menos cantidad de parámetros. De todos modos, los modelos más complejos no siempre son los mejores en términos de precisión o exactitud debido a la pobre aplicabilidad en un medio con pocos datos disponibles (van der Perk, 1997; Wagenet et al., 1998). Además, esta disponibilidad de datos usualmente disminuye al ir a mayores escalas, el proceso de agregación y de obtener promedios puede conducir a serias mal interpretaciones de valores (Stoorvogel et al., 1999).

El papel de los modelos de simulación de cultivos en la investigación

Para entender como funcionan los ecosistemas, los científicos necesitan tener acceso a herramientas tales como los modelos de simulación del crecimiento de cultivos. Conceptualmente, una estrategia de investigación basada en el desarrollo, evaluación y uso de los modelos del crecimiento de cultivos permite enfatizar la investigación basada en los procesos y en el estudio de mecanismos, en lugar del método de prueba y error de la experimentación de campo.

Los modelos de simulación son un importante medio para aumentar la eficiencia de la investigación ya que éstos 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.

El valor de los modelos de simulación para incrementar la eficiencia de la investigación solamente podrá visualizarse si el método de modelación se constituye como una parte integral de la investigación. Se requiere que la investigación y el desarrollo de modelos caminen simultáneamente; mientras que los nuevos conocimientos son utilizados para refinar y mejorar los modelos, los modelos son usados para identificar fisuras en el conocimiento, lo cual a su vez puede contribuir a establecer prioridades en la investigación (Figura 1).

Para tener éxito, el método de modelación requiere que su progreso se evalúe regularmente, asimismo es necesario un continuo refinamiento de objetivos y prioridades. También se necesita de un equipo de investigadores e instituciones comprometidas con el desarrollo de programas (software) y estándares de datos, los cuales faciliten el entendimiento funcional de como operan los ecosistemas.

El propósito de este trabajo es describir brevemente un conjunto comprensivo de modelos de simulación y sus demandas en términos de datos de entrada, así como algunos esfuerzos recientes para evaluar y aplicar estos modelos en los Andes.

Un sistema de apoyo para decisiones de transferencia de agrotecnología (DSSAT)

Desde 1983, un grupo internacional de científicos cooperantes han desarrollado modelos de simulación de cultivos enfocados a proporcionar estimaciones realistas del comportamiento de los cultivos bajo diferentes estrategias de manejo y condiciones ambientales. Estos modelos utilizan un juego estándar de datos de acceso (inputs) y producen un juego estándar de datos de salida (outputs), aún cuando ellos describen los procesos de crecimiento de diferentes maneras; todos utilizan los mismos procedimientos para simular los procesos de suelo, agua y nitrógeno (Jones et al., 1994; Bowen et al., 1998; Jones et al., 1998).

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, su sigla en inglés). El DSSAT permite que los usuarios puedan: 1) acceder, organizar y almacenar datos sobre cultivos, suelos, clima y precios; 2) retraer, analizar y desplegar datos; 3) validar y calibrar modelos de crecimiento de los cultivos; 4) evaluar diferentes estrategias de producción en un lugar dado o dentro de una región; y 5) analizar el riesgo asociado a la variabilidad del clima (Jones et al., 1998).

Actualmente, el DSSAT incluye modelos de cultivos para simular el crecimiento de 16 cultivos, entre otros fréjol, soja, arroz, trigo, papa, yuca y caña de azúcar (Tabla 1). El DSSAT y los modelos de cultivos han sido evaluados, modificados y mejorados

continuamente. La versión más reciente del DSSAT puesta en circulación (Versión 3.5) contiene versiones mejoradas de los modelos, un programa para el manejo de archivos del clima, así como mejores programas de análisis, incluyendo la capacidad para simular y analizar rotaciones de cultivos de largo plazo (Tsuji et al., 1994; Bowen et al., 1998; Jones et al., 1998). La aplicación potencial de los modelos del DSSAT, la manera en que los procesos son simulados, así como los requerimientos de acceso de datos para correr los modelos son cubiertos en los programas de entrenamiento conducidos anualmente por los creadores de los modelos (Tsuji, 1998).

Simulando el crecimiento de los cultivos a niveles crecientes de complejidad con DSSAT

Los modelos del DSSAT son capaces de simular resultados a medida que se incrementa el nivel de complejidad (Figura 2). Los más simples o de primer nivel asumen que el crecimiento está limitado solamente por la cantidad de radiación, temperatura y por el potencial genético; se asumen que el agua y los nutrientes no son limitaciones, la simulación a este nivel proporciona una estimación del rendimiento potencial. El segundo nivel asume que el desarrollo del cultivo puede ser limitado por la disponibilidad del agua; pero los nutrientes no

son limitaciones. El tercer nivel incluye la disponibilidad de nitrógeno como una posible limitación; mientras que el cuarto nivel incluye la disponibilidad del fósforo, además de las restricciones de los niveles anteriores.

Al aumentar el nivel de complejidad en la simulación del crecimiento de un cultivo, la demanda de datos de acceso también aumenta (Figura 2). Los requerimientos de información son acumulativos, por lo tanto, los datos necesarios a un nivel también lo son al nivel superior. Para todos los niveles de complejidad, los modelos de simulación requieren valores diarios de radiación solar, temperaturas máximas y mínimas del aire y precipitación pluvial. Estas cuatro variables determinan los procesos que son descritos dentro de los modelos.

El nivel de complejidad a que un usuario quiera simular dependerá de los objetivos, así como de la disponibilidad de datos de acceso. Por ejemplo, un modelo puede ser usado para comparar el rendimiento potencial de diferentes cultivares de fréjol basándose en la radiación, temperatura y foto período en diferentes sitios. En este caso, el usuario asume que el agua y los nutrientes existen en cantidades suficientes; por lo tanto, cualquier diferencia en rendimiento se atribuye solamente a una interacción entre el

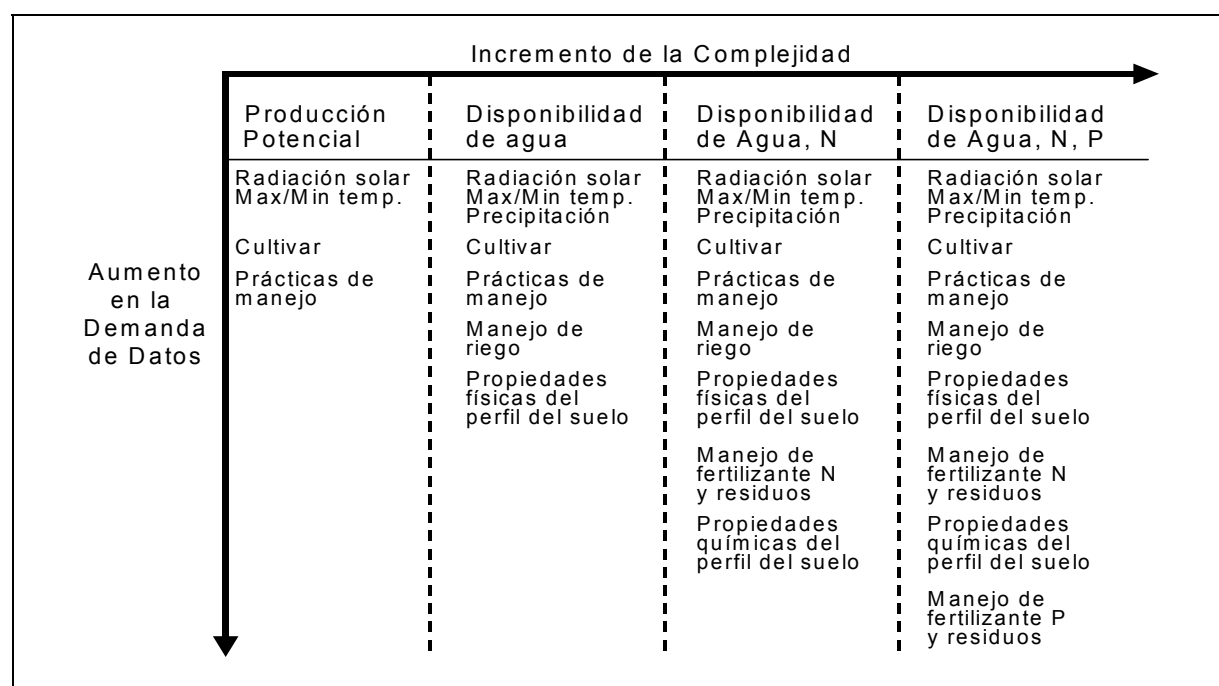


Figura 2. El incremento de los datos necesarios para correr los modelos de simulación de cultivos de DSSAT cuando se incrementa la complejidad de las simulaciones.

genotipo y el ambiente. Para simular rendimiento potencial, los únicos datos de acceso requeridos son las variables de clima, fecha de siembra, población de plantas, espacio entre surcos y un conjunto de parámetros específicos para cada cultivar; no se requiere información del suelo. Sin embargo cuando se amplía el objetivo, se requerirán datos del perfil del suelo, para incluir en la simulación el efecto de la disponibilidad del agua y de los nutrientes (N y P) sobre el rendimiento, o de otros componentes tales como la fijación de nitrógeno o la absorción del fósforo (Figura 2).

Concepto del conjunto de datos mínimos

El nivel de simulación que probablemente interesa más, es el de mayor complejidad, es decir aquel que incluye al agua y al nitrógeno, (los modelos de la versión 3.5, no poseen todavía un submodelo para fósforo incorporado; una versión de trabajo se está evaluando). Algunos de los modelos de cultivos de DSSAT, tales como CROPGRO, incluyen opciones para simular fotosíntesis a nivel hoja, la interceptación de la luz por el follaje de los surcos contiguos, la dinámica del nitrógeno del suelo, la absorción del nitrógeno, la fijación de nitrógeno y el daño causado por las plagas (Batchelor et al., 1993; Boote et al., 1998).

El mejoramiento y las pruebas de los distintos submodelos, requieren de experimentos de campo bien conducidos. Los datos pueden provenir de ensayos previos, o de experimentos implementados con este fin específico. Se utiliza la información para correr el modelo, así como para probar su validez contra datos de experimentos reales. Consecuentemente surge la pregunta, ¿Qué clase de datos se necesita?

Varios esfuerzos anteriores para la elaboración y ensayo de modelos han ayudado a definir un conjunto de datos mínimos sobre suelo, clima, cultivos y manejo que es esencial para la interpretación efectiva de los experimentos de campo (Hunt and Boote, 1998). La definición de estos conjuntos de datos mínimos ayuda a (1) obtener la documentación adecuada de los experimentos de campo y (2) proporcionar datos experimentales para el desarrollo y prueba de los modelos. Lo que sigue a continuación es una breve descripción de los principales componentes de estos conjuntos de datos mínimos.

Tabla 1. Principales modelos de cultivos incluidos en la versión 3.5 del DSSAT.

Modelo de cultivo	Cultivo simulado
CERES-Generic	Maíz, Trigo, Cebada, Mijo, Sorgo
CERES-Rice	Arroz (de secano y de inundación)
CROPGRO	Soja, Maní, Fréjol, Garbanzo, Tomate, Pasto
OILCROP-SUN	Girasol
SUBSTOR-Potato	Papa
CROPSIM-Cassava	Yuca
CANEGRO	Caña de azúcar

Variables del Clima

Se requiere de una estación meteorológica ubicada cerca de los experimentos de campo con el fin de registrar datos diarios de precipitación pluvial, temperatura máxima, temperatura mínima y radiación solar. Estas variables constituyen el motor de los modelos. La radiación recibida también puede medirse con el número de horas de sol. En la mayor parte de las áreas, una estación meteorológica dentro de una distancia de 500 metros puede proporcionar medidas confiables. A distancias mayores los patrones de lluvia pueden ser significativamente diferentes. Como una alternativa, en caso de que la temperatura y la radiación fueran medidas a una distancia mayor de 500 metros, para registrar la lluvia se hace necesario colocar un pluviómetro en el mismo lugar del experimento.

Características del Perfil del Suelo

Los modelos simulan los procesos del suelo basándose en propiedades definidas por los diferentes horizontes del suelo, hasta por lo menos la profundidad máxima de enraizamiento. Las propiedades más importantes de cada horizonte incluyen: la profundidad desde la superficie del suelo hasta el límite inferior de cada horizonte, el punto de marchitamiento permanentes (PMP), la capacidad de campo (CC), la densidad aparente, el contenido de carbón y nitrógeno, el pH del suelo y el fósforo aprovechable. Las constantes de humedad PMP y CC son mejor estimados en el campo; sin embargo, se pueden obtener estimaciones

iniciales a partir de la textura, la densidad aparente y el contenido de carbón orgánico.

Coefficientes Específicos del Cultivar

Los modelos simulan el efecto de la temperatura y del fotoperíodo durante el desarrollo vegetativo, el desarrollo reproductivo y los procesos de crecimiento. Para lograr lo anterior se proporcionan coeficientes específicos del cultivar, los cuales describen la sensibilidad a la temperatura y el fotoperíodo para cada cultivar, y definen los valores de inicio para la germinación, la floración (o iniciación del tubérculo) y la madurez fisiológica. También se dan otros coeficientes específicos, tales como la tasa de aparición de las hojas, el tamaño promedio de las hojas, el espesor de las hojas, la tasa de aparición de las flores, la tasa de aparición de vainas, la tasa de crecimiento de la semilla individual y la cáscara, así como el número de semillas por vaina (Boote et al., 1998). Estos coeficientes son por lo general calculados de la información de experimentos de campo, en los cuales las condiciones de crecimiento han sido optimizadas. Si éstos son calculados cuidadosamente, los coeficientes de los cultivos podrán ser los mismos para todas las localidades.

Variables de las Prácticas de Manejo

Enseguida se definen algunas de estas prácticas de manejo:

- Fecha de siembra, profundidad de siembra, población de plantas y la distancia entre surcos.
- Fechas de riego, cantidad de agua aplicada y la clase de sistema de riego.
- Fecha de aplicación del fertilizante nitrogenado, cantidad aplicada, método de aplicación, profundidad de aplicación y clase de fertilizante nitrogenado.
- Cantidad de residuos del cultivo anterior, el contenido de nitrógeno y fósforo de los residuos, profundidad de incorporación y fecha de incorporación.
- Fecha de aplicación del fertilizante fosfórico, cantidad aplicada, método de

aplicación, profundidad de aplicación y clase de fertilizante fosfórico.

- Contenido total y soluble de P₂₀₅ de la roca fosfórica cuando se usa como fuente de fósforo.

Condiciones Iniciales

Los modelos necesitan iniciar la simulación con algunas estimaciones iniciales del agua del suelo, nitratos, amonio y fósforo disponibles. En lo posible estas variables deben ser medidas a diferentes profundidades al momento de la siembra o con anterioridad a esta. Por ejemplo, las condiciones iniciales podrán ser determinadas para cada capa de suelo de 10 a 15 cm hasta una profundidad de 120 cm. Si estas variables son medidas, deberán registrarse las fechas en que las muestras de suelo fueron tomadas, así como los intervalos de profundidad correspondientes.

Variables Medidas

Los datos anteriores son suficientes para correr el modelo, sin embargo, para probar críticamente la eficiencia de un modelo se requiere de datos adicionales. Esta información adicional incluye mediciones hechas durante el curso de los experimentos y pueden incluir variables tales como la acumulación de biomasa, el contenido de agua del suelo o el contenido de nitrógeno de la planta durante varias fechas del ciclo del cultivo. Estas mediciones, así como muchos otros valores medidos pueden ser comparados con los resultados simulados (output) para evaluar la eficiencia del modelo.

Ejemplos del uso de DSSAT en la región andina, el caso del nitrógeno

SUBSTOR (Ritchie et al., 1995), otro de los modelos integrados en la familia DSSAT se ha empleado en la comparación del desempeño de variedades y en la eficiencia en el uso de nitrógeno en varias localidades andinas. Al igual que todos los modelos de DSSAT, SUBSTOR incorpora herramientas que nos permiten incorporar el efecto del manejo y el clima en el balance de nitrógeno.

Para comprobar la validez del uso de SUBSTOR en la región andina, se estudió el ajuste de las predicciones del rendimiento simulado y medido

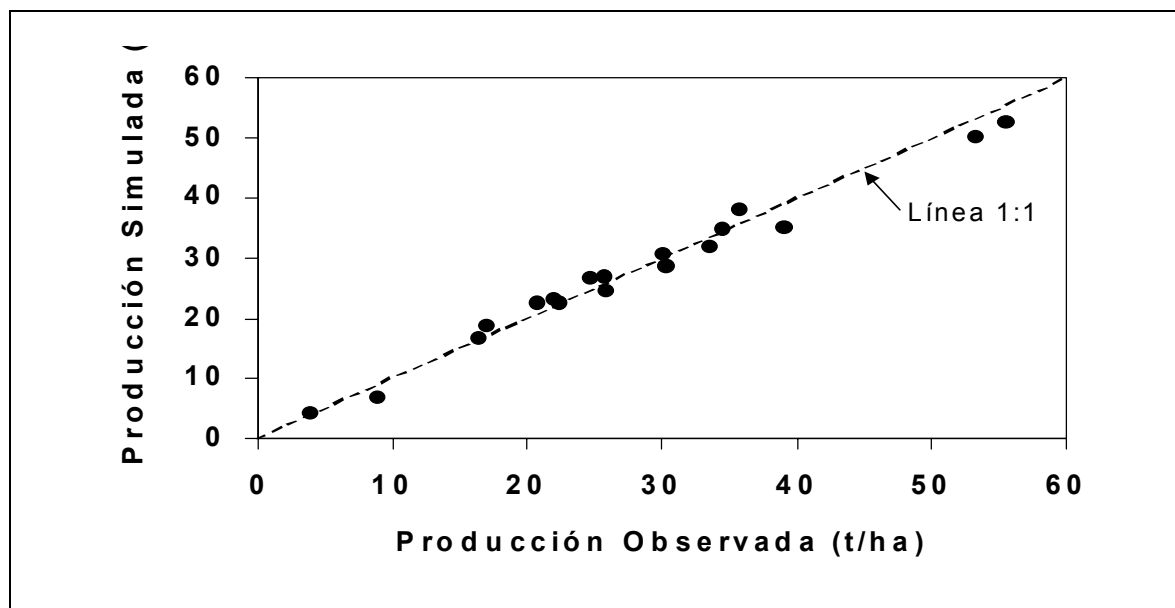


Figura 3. Relación entre la producción simulada con SUBSTOR-Papa y la observada en el peso fresco de tubérculos para distintos sitios en Bolivia, Ecuador, Perú y Venezuela.

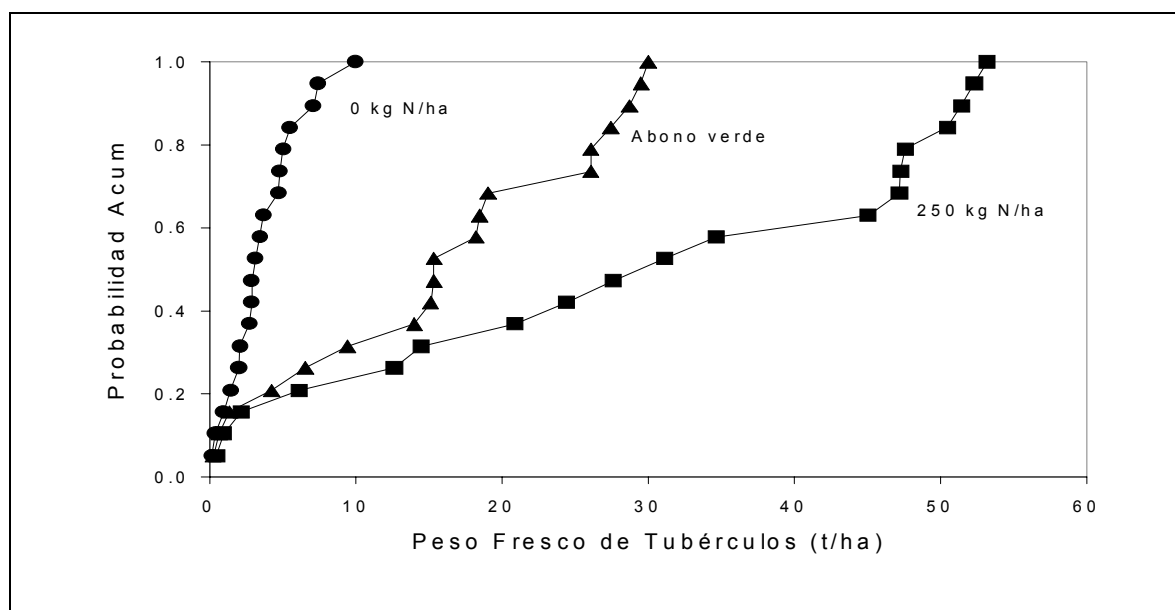


Figura 4. Distribuciones de probabilidad acumulada para el rendimiento en peso fresco de tubérculos de tres fuentes de nitrógeno, resultado de la simulación de 19 temporadas en Huancayo, Perú.

en varias localidades en la subregión (Yauri, 1997; Clavijo, 1999). Los resultados resumidos en la figura 3, muestran que el modelo estimó de una manera realista rendimientos que se ubicaron en el rango de 16 hasta 56 t/ha.

Con una herramienta valida es posible estimar los resultados de distintos escenarios, por ejemplo, se ha simulado los efectos de dos fuentes de nitrógeno: Abono verde (4.5 T/ha, 2.5 % contenido de N) y de 250 Kg de N aplicados

como urea. Con el fin de estimar las potencialidad de estas fuentes al interior de un período de 19 años en la localidad de Huancayo, Perú (Bowen et al., 1999). Los resultados sumariados de la simulación del rendimiento de tubérculos frescos, se presentan en la figura 4, a manera de un gráfico de probabilidades acumuladas.

Se demuestra que el rendimiento es mucho mayor con la aplicación de la urea, pero así

mismo se observa que en un 15% de las temporadas evaluadas, no existió respuesta a la aplicación de urea, debido a la falta de agua.

Conclusiones

La agricultura en la región andina se enfrenta constantemente a nuevos retos, debido a cambios en las políticas macroeconómicas, al crecimiento de la población, a los niveles reducidos de producción de las zonas altas y a los límites en la sostenibilidad de los recursos naturales utilizados. Conocer en detalle la dinámica y efectos de los principales factores involucrados en el desarrollo, y elaborar alternativas viables de progreso para las zonas rurales andinas; conservando los recursos naturales mediante su uso racional, son aspectos de especial importancia y deben ser prioridades de actualización profesional.

Para este propósito, la simulación es una de las herramientas de mayor utilidad. Los modelos de simulación debidamente evaluados y validados mejoran la eficiencia en los procesos de investigación, transferencia de tecnología y desarrollo agrícola, permitiendo extrapolar resultados a otras localidades con similares características. Establecidos dentro de un sistema integral de manejo de información, los modelos pueden utilizarse para un análisis efectivo en aspectos relacionados a la producción, la asignación de recursos, el riego, la calidad ambiental y el uso de la tierra.

Referencias

- Addiscott, T. M. 1993. Simulation modelling and soil behavior. *Geoderma* 60: 15-40.
- Batchelor, W. D., J. W. Jones, K. J. Boote and P. H.O. 1993. Extending the use of crop models to study pest damage. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering* 36(2): 551-558.
- Boote, K. J., J. W. Jones, G. Hoogenboom and N. B. Pickering 1998. The CROPGRO model for grain legumes. p. 99-128. In G.Y. Tsuji, G. Hoogenboom, and P.K.Thornton (eds) *Understanding options for agricultural production*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Bowen, W.T., P.K. Thornton, and G. Hoogenboom. 1998. The simulation of cropping sequences using DSSAT. p. 317-331. In G.Y. Tsuji, G. Hoogenboom, and P.K.Thornton (eds) *Understanding options for agricultural production*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Bowen, W., H. Cabrera, V. Barrera, and G. Baigorria. 1999. Simulating the response of potato to applied nitrogen. p. 381-386. CIP Program Report 1997-1998. International Potato Center, Lima, Peru.
- Clavijo, N. 1999. Validación del modelo de simulación del sistema DSSAT en el cultivo de la papa (*Solanum tuberosum* L.) en las condiciones del catón Montufar, provincia del Carchi. 85 p. Riobamba, Ecuador, Escuela Superior Politecnica del Chimborazo.
- Hunt, L. A. and K. J. Boote. 1998. Data for model operation, calibration, and evaluation. p. 9-41. In G.Y. Tsuji, G. Hoogenboom, and P.K.Thornton (eds.) *Understanding options for agricultural production*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Jones, J. W., L. A. Hunt, G. Hoogenboom, D. C. Godwin, U. Singh, G. Y. Tsuji, N. P. Pickering, P. K. Thornton, W. T. Bowen, K. J. Boote and J. T. Ritchie. 1994. Input and output files. p. In DSSAT v3 Vol 2-1. G. Y. Tsuji, G. Uehara and S. Balas. Honolulu, University of Hawaii.
- Jones, J. W., G. Y. Tsuji, G. Hoogenboom, L. A. Hunt, P. K. Thornton, P. W. Wilkens, D. T. Imamura, W. T. Bowen and U. Singh. 1998. Decision support system for agrotechnology transfer:DSSAT v3. p. 157-177. In G. Y. Tsuji, G. Hoogenboom and P. K. Thornton (eds) *Understanding Options for Agricultural Production..* Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- Keen, R.E., and J.D. Spain. 1992. Computer simulation in biology: a BASIC introduction. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Ritchie, J. T., T. S. Griffin and B. S. Johnson. 1995. SUBSTOR: functional model of potato growth, development and yield. p. 401-435. In P. Kabat (ed) *Modelling and parameterization of the soil-plant-atmosphere system*. Wageningen Press, The Netherlands.
- Stoorvogel, J. J., L. Kooistra and J. Bouma. 1999. Spatial and temporal variation in nematode leaching, management implications for a Costa Rican banana plantation. p. 281-289. In *Assessment of non-point source pollution in the vadose zone*. Washington, DC, American Geophysical Union. Geophysical Monograph 108.
- Tsuji, G. Y. 1998. Network management and information dissemination for agrotechnology transfer. p. 367-383. In G. Y. Tsuji, G. Hoogenboom and P. K. Thornton (eds) *Understanding Options for Agricultural Production..* Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- van der Perk, M. 1997. Effect of model structure on the accuracy and uncertainty of result from water quality models. *Hydrological Processes* 11: 227-239.
- Wagenet, R. J., J. Bouma and J. L. Huston. 1998. Conceptual and methodological aspects of assessing pesticide environmental impact in developing areas. p. 41-64. In C.C. Crissman, J.M. Antle, and S.M. Capalbo (eds) *Economic, environmental and health tradeoffs in agriculture: Pesticides and the sustainability of Andean potato production*. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- Yauri, H. 1997. Validación de un modelo para simular el crecimiento del cultivo de papa. p. 98. Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria.