

EVALUACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN CropSyst PARA MAÍZ DE REGADÍO EN EL VALLE DEL EBRO

F. FERRER ¹, J.M. VILLAR ¹, C.O. STOCKLE ²

¹ Dpto. de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo. Universitat de Lleida. Avda. Alcalde Rovira Roure, 177. 25198 Lleida

² Biological Systems Engineering Dept. Washington State University. Pullman, WA 99164-6120. USA
villar@rektorat.udl.es

RESUMEN

Previamente a la aplicación del modelo para la evaluación de las prácticas de manejo de la fertilización N en el área regable del Canal de Urgell (Lleida), se procedió a una validación exhaustiva de las capacidades predictivas del modelo de simulación CropSyst en las condiciones de suelo, clima, cultivo y manejo, existentes en la zona. Para tal fin, se compararon los resultados de las simulaciones frente a las medidas obtenidas en un experimento de campo con dosis crecientes de nitrógeno en maíz (*Zea mays* L.), referentes al crecimiento del cultivo y la dinámica del agua y el nitrógeno en el sistema suelo-planta. CropSyst predijo correctamente la fenología del cultivo. A nivel general, el modelo fue capaz de predecir de forma razonablemente correcta el rendimiento, biomasa y N absorbido hasta la madurez fisiológica, aunque se observaron discrepancias importantes en los tratamientos con fertilización cero (N-0). De los análisis más detallados se pudo constatar que CropSyst hace un trabajo razonable en la simulación de la demanda de N por el cultivo y la respuesta del crecimiento al N absorbido. Las divergencias observadas permitieron detectar errores inherentes al modelo referentes a la insensibilidad del índice de cosecha, a la falta de N y en la simulación del movimiento de agua y nitratos en el suelo. Otros errores atribuibles al modelo estuvieron más relacionados con la estimación de ciertos parámetros que afectan el ritmo de acumulación de biomasa y N, con la variabilidad espacial no considerada de los perfiles iniciales de N-NO₃ en el suelo, y con la incertidumbre del N aplicado con el agua de riego.

PALABRAS CLAVE: Evaluación de modelos de simulación
CropSyst
Maíz
Fertilización nitrogenada
Biomasa
Nitrógeno en planta
N-NO₃ en el suelo

Recibido: 10-1-00

Aceptado para su publicación: 16-5-00

INTRODUCCIÓN

El maíz es uno de los cultivos más importantes en la zona regable de los Canales de Urgell y en el Valle del Ebro en general. La aplicación de fertilizantes nitrogenados en dosis superiores a las necesidades reales del cultivo y su alta facilidad de ser transportado a aguas subterráneas mediante el agua de riego y la precipitación, hacen necesario el ajuste de las prácticas de manejo de la fertilización N a nivel de parcela. Con la finalidad de estudiar las posibilidades del análisis del contenido de N-NO₃ en el suelo en pre-cobertera (PSNT) como herramienta de diagnóstico del N disponible en el suelo y de las necesidades de fertilizante N del cultivo, Ferrer (1999) realizó experimentos en la zona con diferentes dosis de N aplicado.

En este contexto, los modelos de simulación permiten complementar la información experimental, así como evaluar y desarrollar prácticas de fertilización nitrogenada adecuadas. No obstante, antes de aplicar un modelo es necesaria una evaluación de su capacidad de simulación en las condiciones de suelo, clima, cultivo y manejo existentes en la zona. Con esta finalidad, la capacidad de CropSyst (Stockle y Nelson, 1998) para simular el crecimiento del cultivo y la dinámica del agua y el nitrógeno en el sistema suelo-planta-atmósfera, ha sido evaluada de forma preliminar por Villar *et al.* (1996), Ferrer *et al.* (1997b) en la zona de estudio, y en otras condiciones por Stockle *et al.* (1994), Pala *et al.* (1996), Stockle y Debaeke (1997), Stockle *et al.* (1997) y Donatelli *et al.* (1997). En el presente estudio se procedió a una validación más exhaustiva de las capacidades predictivas de CropSyst. Para tal fin, se utilizaron las medidas obtenidas en los experimentos de campo descritos por Ferrer (1999). Igualmente, se hizo una aplicación, a modo de revisión, de las diferentes metodologías, tanto gráficas como numéricas, disponibles a la hora de analizar el comportamiento de modelos de simulación.

MATERIAL Y MÉTODOS

El modelo

El modelo de simulación CropSyst (Stockle y Nelson, 1998), con un intervalo de ejecución diario, permite simular varios cultivos extensivos durante varios años. CropSyst simula el balance de N y agua en el suelo, la fenología del cultivo, absorción de agua y nitrógeno, la intercepción de radiación por la cubierta vegetal, el crecimiento y desarrollo del área foliar, la producción de biomasa, el rendimiento final, así como la producción y descomposición de residuos de cultivo y la erosión del suelo. El modelo incorpora los efectos sobre estos procesos según las condiciones climáticas, tipo de suelo y características del cultivo, incluyendo una variedad de opciones agronómicas de manejo (riego, fertilización, manejo de residuos, elección varietal y rotación). CropSyst tiene la posibilidad de realizar análisis de impacto ambiental (erosión, lixiviación y cambio climático).

Datos experimentales

Para la parametrización y validación del modelo se utilizaron datos obtenidos de los experimentos de campo descritos con detalle por Ferrer (1999). Dichos experimentos consistie-

ron en dos parcelas experimentales durante 1996 (P-1 y P-2) y cuatro parcelas en 1997 (P-3 a P-6), en las cuales se cultivó maíz (*Zea mays* L.) en condiciones de regadío. Los tratamientos consistieron en cuatro dosis de fertilizante N aplicados en cobertera (N_0 : 0UN, N_1 : 100UN, N_2 : 200UN y N_3 : 300UN), con bloques al azar y tres repeticiones en cada tratamiento, excepto para las parcelas P-5 y P-6 donde sólo hubo dos repeticiones. El tamaño de la parcela elemental fue de $3,5 \times 14$ m (49 m²). Las prácticas de manejo realizadas en los experimentos, a parte de la fertilización N, fueron las usuales en la zona, con riego de superficie por tablares, aplicado cada 10-14 días. Durante el ciclo de cultivo se determinó el contenido de N-NO₃ y agua en el perfil del suelo cada 30 cm, se controlaron los estadios de desarrollo del cultivo, se siguió el contenido de N y la acumulación de biomasa y nitrógeno de la parte aérea del cultivo, y en cosecha se determinó la biomasa y el rendimiento. Se dispusieron de datos climáticos diarios acumulados de precipitación y radiación solar, y de datos diarios medios de temperatura máxima y mínima, humedad relativa y velocidad del viento.

Parametrización del modelo

Las propiedades hidráulicas del suelo requeridas por CropSyst fueron estimadas a partir de información de campo sobre las fracciones de arena, limo y arcilla, el contenido de elementos gruesos y la densidad aparente. Para ello se utilizaron las ecuaciones de pedo-transferencia implementadas en CropSyst, basadas en el trabajo de Saxton *et al.* (1986). Las características del horizonte superficial de los suelos utilizados en las simulaciones se detallan en la Tabla 1.

TABLA 1
CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS UTILIZADOS EN LAS
SIMULACIONES (0-30 CM)

Soil characteristics used in the simulations

Experimento Año	P-1 1996	P-2 1996	P-3 * 1997	P-4 1997	P-5 * 1997	P-6 1997
Información de campo						
Prof. Efectiva (cm)	90	90	60	90	60	90
Prof. Capa freática (cm)	80-100	80-100	60-80	80-100	No	80-100
Cont. Materia Org., %	2,4	1,7	2,4	4,1	2,7	2,8
Elemen. Gruesos (% vol)	NO	NO	10	NO	10	NO
Arena, %	13,7	11,9	38	8,7	47,2	13,2
Limo, %	52,1	57,1	34,7	48,2	31,1	53,8
Arcilla, %	34,2	31	27,3	43,1	21,7	33
Densidad aparente (Mg m ⁻³)	1,40	1,40	1,54	1,40	1,54	1,40
Estimados por CropSyst						
P. marchitez perm. (m ³ m ⁻³)	0,18	0,19	0,14	0,24	0,12	0,18
Capacidad campo (m ³ m ⁻³)	0,35	0,36	0,26	0,39	0,23	0,34

Contenido de agua (m³ m⁻³) en Capacidad de Campo y en el Punto de Marchitez Permanente modificados en función del contenido de elementos gruesos.

Volumetric water content (m³ m⁻³) at field capacity and permanent wilting point, modified according to the soil content of coarse elements.

Para los horizontes sub-superficiales la textura fue parecida al horizonte superficial y se consideró la misma densidad aparente que en superficie. En las parcelas con elementos gruesos (EG) en el suelo (P-3 y P-5), se modificaron los parámetros hidráulicos en función del contenido de EG y utilizando las ecuaciones descritas por Campbell (1985). Se utilizó el modelo de Priestley-Taylor (P-T) para el cálculo de la evapotranspiración potencial, dado que no se disponían de datos diarios de humedad relativa mínima y máxima. Los valores para los parámetros de Factor de Aridez y Constante de P-T utilizados por el modelo fueron de 0,04 y 1,35, respectivamente. Los parámetros requeridos para la simulación de la mineralización neta y denitrificación del N en el suelo fueron calibrados, comparando los valores simulados con los obtenidos experimentalmente de mineralización neta acumulada y de contenido de N-NO₃ en el suelo, respectivamente. Los parámetros de cultivo necesarios en CropSyst se pueden obtener a partir de: a) medidas directas en campo, b) cálculo indirecto a partir de dichas medidas, c) valores citados en el manual de CropSyst u otros estudios similares, o d) ajustando el valor de los parámetros como resultado de correr el programa hasta que el resultado de la simulación coincida con los valores observados en campo (calibración), a criterio del investigador. Addiscot *et al.* (1995) consideraron la primera opción como la más adecuada. En la Tabla 2 se resumen los principales parámetros de cultivo de CropSyst y su método de obtención.

Validación del modelo y análisis de los datos

Para tener una apreciación de la capacidad predictiva del modelo, los resultados obtenidos de las simulaciones se compararon con los datos experimentales de campo. La información experimental utilizada para la validación del modelo fue independiente de los tratamientos utilizados para la calibración. Así, se utilizaron los datos obtenidos en todos los tratamientos excepto P1-N₃ y P-2-N₃. Las parcelas utilizadas en la validación se diferenciaron en el tipo de suelo, fecha de siembra y condiciones climáticas del año. No se incluyeron en las simulaciones, la respuesta del cultivo a la salinidad, a los niveles atmosféricos de CO₂, a la vernalización y al fotoperíodo, ni el transporte de pesticidas en el suelo. Se consideraron niveles bajos de residuo en cosecha. Se simuló capa freática cuando ésta estaba por encima de los 90 cm (sólo en la parcela P-3). La adición de N con el agua de riego se simuló mediante aplicaciones de fertilizante en la superficie del suelo en el día de riego. Estas aplicaciones se calcularon en función de la dosis de riego y del contenido de NO₃ del agua. Las simulaciones se implementaron considerando los perfiles iniciales de N-NO₃ y agua en el suelo medidos experimentalmente, y las fechas de aplicación de riego y fertilizante efectuados en campo. Para la realización del estudio se eligió la opción de Diferencia Finita (solución numérica de la ecuación de convección-dispersión) para el transporte de agua y solutos en el suelo.

Para el análisis de la exactitud y precisión de la capacidad predictiva del modelo, se calcularon distintos índices estadísticos, complementados con gráficos 1:1 que permiten visualizar la correspondencia entre los valores simulados y observados. No se realizaron pruebas de significación estadística para la interpretación de los índices estadísticos calculados, dado que su utilidad ha sido puesta en duda por varios autores (Willmott, 1982; Harrison, 1990). Según dichos autores, el uso de gráficos y el cálculo de medidas descriptivas de la diferencia entre los valores observados y simulados son herramientas suficientemente útiles a la hora de decidirse por un modelo u otro, de evaluar cambios realizados en el modelo o de evaluar la posible aplicación del modelo para fines de manejo. La fiabi-

TABLA 2
PARÁMETROS DE CULTIVO UTILIZADOS EN LAS SIMULACIONES
Crop parameters used in the simulations

Parámetro	Valor
Medido o estimado de datos de campo	
Absorción máxima de agua (mm)	11
Profundidad de raíz máxima (m)	1,5
Índice de área foliar máxima, LAI _{máx}	6,7
Coefficiente de cultivo de evapotranspiración	1,15
Área específica de hoja	18
Coefficiente de partición hoja/tallo	2
Índice de cosecha	0,54
Fracción de residuo en el suelo después de cosecha (%)	5
Concentración de N en planta máxima inicial (%)	3,5
Concentración de N en planta máxima en madurez (%)	1
Concentración de N en planta mínimo en madurez (%)	0,75
Concentración de N en el residuo de cosecha (%)	0,66
Manual CropSyst	
Coefficiente de conversión PAR/biomasa (g MJ ⁻¹)	4,0
Relación ET _{real} /ET _{pot} para crecimiento de cubierta nulo	0,95
Relación ET _{real} /ET _{pot} para crecimiento de raíz nulo	0,50
Potencial de xilema crítico (J kg ⁻¹)	-1.200
Potencial de xilema de marchitez permanente (J kg ⁻¹)	-1.800
Fracción de LAI en madurez	0,8
Coefficiente de extinción de la radiación	0,46
Sensibilidad de la duración foliar al estrés hídrico	1
Temperatura base para el desarrollo (°C)	8
Temperatura máxima para el desarrollo (°C)	25
Sensibilidad del desarrollo al estrés hídrico	1
Sensibilidad del índice de cosecha al estrés hídrico	
Durante floración	0,30
Durante llenado de grano	0,10
Factor de translocación	0,3
Constante de descomposición de los residuos (días)	60
Relación área/biomasa del residuo (m ² kg ⁻¹)	4
Parámetro de Ajuste absorción N	1,3
Calibración	
Temperatura por debajo la cual se ralentiza el crecimiento (°C)	17
Coefficiente de conversión transpiración/biomasa (kPa kg m ⁻³)	10,0
Duración de la cubierta vegetal (grados día)	1.000
Grados día a emergencia	70
Grados día a inicio floración (aparición sedas)	1.000
Grados día a inicio llenado de grano	1.250
Grados día a madurez fisiológica	1.800
N-NO ₃ residual por capa de suelo	3

lidad de los datos de campo, tanto referidos a los datos necesarios para la inicialización de las simulaciones, como a las variables contrastadas con el modelo, y la magnitud del error experimental (calidad), son aspectos esenciales a la hora de interpretar discrepancias.

Las medidas estadísticas utilizadas se basan en la separación de la suma de cuadrados de la diferencia entre los valores observados (O) y simulados (S). Siguiendo parcialmente el método propuesto por Whitmore (1991), se puede partir la suma de cuadrados residual (SCR) entre un error experimental (SCE) y un error atribuible a la incapacidad de simulación del modelo (SCS) (ver Anexo I). Paralelamente, se utilizaron algunas de las medidas descriptivas propuestas por Willmott (1982), Loague y Green (1991). Tanto el índice de concordancia (d) de Willmott (1982), como la Eficiencia del Modelo (EF) propuesto por Loague y Green (1991), son índices relativos de la discrepancia entre los valores simulados y observados (ver Anexo I).

La comparación gráfica de la evolución del contenido de N-NO₃ en el perfil del suelo y la acumulación de biomasa y N por el cultivo permitió comprobar la capacidad de simulación de los submodelos correspondientes al transporte de N en el suelo, la absorción de N y crecimiento del cultivo. Finalmente, y dado que se pretende utilizar el modelo con fines prácticos en la recomendación de la fertilización N a nivel de parcela, se calcularon las diferencias entre valores observados y simulados de absorción de N, y se interpretaron teniendo en cuenta que el agricultor no discierne en la dosis a aplicar en menos de 20 kg ha⁻¹ (Addiscott y Whitmore, 1987; conocimiento local).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo predijo razonablemente bien la fenología del cultivo. La diferencia promedio entre las fechas de emergencia, salida de estilos, grano lechoso y madurez fisiológica observadas y simuladas fue de cinco días. Dicha discrepancia es aceptable si se considera que las parcelas en campo se visitaron aproximadamente cada siete días y, por tanto, hay un cierto error experimental asociado a las fechas observadas en campo.

En la Fig. 1 se comparan gráficamente los valores simulados con los datos observados de biomasa final (a), rendimiento (b) y N absorbido (c). En la Tabla 3 se detallan los diferentes índices estadísticos calculados para el análisis de las diferencias entre los valores simulados y los valores observados.

Los índices estadísticos calculados en la Tabla 3 muestran que la comparación de los datos simulados y observados no fue muy satisfactoria. El coeficiente de correlación (r^2) osciló entre 0,34 y 0,57. Los índices d y EF calculados dieron valores poco cercanos a la unidad, lo que confirma cierta divergencia relativa entre los datos observados y las predicciones del modelo. Igualmente, según Loague y Green (1991), el valor negativo del índice EF para la variable N absorbido representa que para la estimación del N absorbido hubiera sido más favorable utilizar el promedio de los datos observados que las predicciones hechas por el modelo.

La observación de los gráficos 1:1 (Fig. 1) muestra que en general el modelo sobrepredijo ligeramente las variables evaluadas. Este hecho se confirma comparando las medias de las variables en la Tabla 3, que en todos los casos no se diferenciaron en más de un 12 % (respecto a la media observada). No obstante, en la Fig. 1 se detectan mayores divergencias para valores pequeños, correspondientes mayoritariamente a los tratamien-

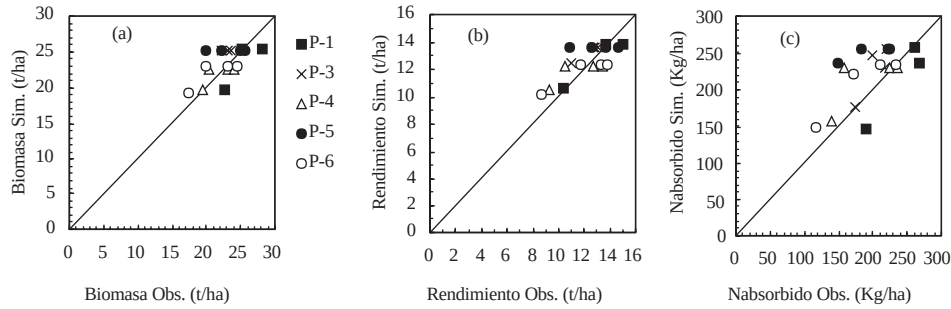


Fig. 1.—Valores simulados vs. datos observados de biomasa final (a), rendimiento (b) y N absorbido por el cultivo (c)

Simulated and observed values of biomass (a), yield (b) and crop N uptake(c)

TABLA 3

ÍNDICES ESTADÍSTICOS PARA EVALUAR LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Statistical indexes to assess the results from the simulations

	Rendimiento Grano (0% humedad)	Biomasa	N absorbido
N	19	19	19
O _{avg} (t ha ⁻¹)	12,32	22,82	200
S _{avg} (t ha ⁻¹)	12,65	23,45	223
RMSE	1,18	2,20	41
RelRMSE (%)	10	10	20
EF	0,53	0,22	-0,06
d	0,82	0,74	0,73
(SSE/RSS)	0,31	0,29	0,19
a Intercept	6,51	12,63	112
b Slope	0,498	0,473	0,55
r ²	0,57	0,34	0,37
MSE _s /MSE	0,44	0,61	0,50
RMSE _s	1,45	0,92	28
RMSE _u	1,64	0,74	29

N: número de observaciones; O_{avg}: valor medio observado; S_{avg}: valor medio simulado; RMSE: raíz de la diferencia de cuadrados; RelRMSE: 100·(RMSE/O_{avg}); EF: Eficiencia del modelo (Loague y Green, 1991); d: Índice de concordancia (Willmott, 1982); RelRMSE_s: 100·(RMSE_s/O_{avg}); RelRMSE_u: 100·(RMSE_u/O_{avg}); RSS: Suma de cuadrados de (O_{ij}-S_j) (Whitmore, 1991); SSE: suma de cuadrados atribuible al error. Para más detalle referirse al Anexo I.

N: number of observations; Oavg: average observed value; Savg: average simulated value; RMSE: root mean square error; RelRMSE: 100 (RMSE/Oavg); EF: Model efficiency (Loague and Green, 1991); d: index of concordance (Willmott, 1982); RelRMSEs: 100 (RMSEs/Oavg); RelRMSEu: 100 (RMSEu/Oavg); RSS: (Oij-Sj) sum of squares (Whitmore, 1991); SSE: sum of squares due to error. For extended details refer to Annex I.

tos control (N-0). Para los tratamientos sin aplicación de fertilizante N, los resultados de la simulación fueron muy sensibles al contenido inicial de N-NO_3 en el suelo y a la cantidad de N-NO_3 aportado con el agua de riego. En el primer caso, no se dispusieron de medidas repetidas del contenido inicial de N-NO_3 en el suelo y se utilizó el mismo perfil para todos los tratamientos de una misma parcela. Para la segunda variable, y en las condiciones del estudio, fue difícil estimar con exactitud la cantidad de N-NO_3 aportado por el agua de riego, que puede llegar a ser importante en el cultivo del maíz (Ferrer *et al.*, 1997a). Esta inexactitud en los datos de entrada podría explicar el mal comportamiento del modelo para estos escenarios limitantes en nitrógeno. Otro motivo de discrepancia estaría relacionado con la incapacidad del modelo para simular el efecto del déficit de N sobre el índice de cosecha que se observó en campo (Ferrer, 1999) y la distorsión que este efecto ocasiona en los rendimientos simulados para los tratamientos con poco nitrógeno.

La representación gráfica de la relación entre la biomasa acumulada y el N absorbido por el cultivo (Fig. 2) permite estudiar de forma cualitativa si el modelo fue capaz de integrar los efectos que sobre el crecimiento tuvieron la cantidad de N absorbido, intercepción de radiación por la cubierta y el estado hídrico de la planta. El método de Cate-Nelson (Cate y Nelson, 1971) permitió deducir que, para valores superiores a 230 kg ha^{-1} N absorbido, se obtuvieron producciones superiores a 25 t ha^{-1} de biomasa, tanto para los datos observados como para los simulados. Al calcular la inversa de la pendiente de la regresión lineal entre las dos variables, se obtuvo que se necesitaron 18 kg N t^{-1} biomasa y 20 kg N t^{-1} biomasa para los valores observados y simulados, respectivamente. Se deduce que, en cierta forma, el modelo predijo adecuadamente la respuesta del crecimiento al N absorbido por el cultivo.

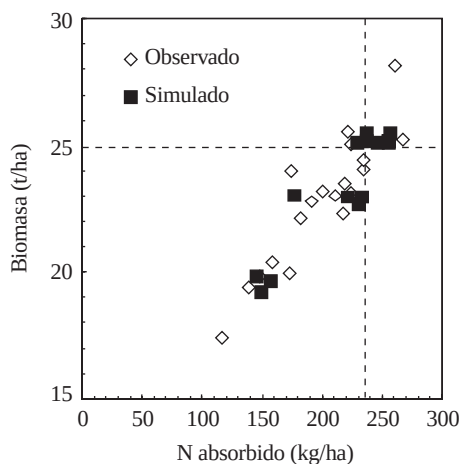


Fig. 2.—Relación entre biomasa final y N absorbido por el cultivo. Datos observados y simulados
Relationship between Crop N uptake and final biomass. Observed and simulated data

Las Figs. 3 y 4 permiten una evaluación más detallada de los resultados obtenidos en la parcela P-3. La Fig. 3 muestra cómo la simulación de la dilución del contenido de N en planta, y por tanto de la demanda de N por parte del cultivo, fue muy correcta. La curva de acumulación de la biomasa y nitrógeno mostró cierto desajuste, sobre todo durante el período correspondiente al crecimiento vegetativo y floración. El modelo parece que simuló un ritmo de crecimiento superior al observado en campo. Este desajuste podría estar relacionado con la estimación de ciertos parámetros que condicionan el ritmo de crecimiento del cultivo. Si se observan los perfiles de N-NO₃ en el suelo representados en la Fig. 4, se puede apreciar cómo el modelo predijo de forma bastante adecuada la evolución del perfil de N-NO₃ del suelo, incluso teniendo en cuenta la magnitud del error experimental observado en algunas de las observaciones. Éste no es el caso para los perfiles simulados en la parcela P-4 (datos no mostrados), donde el modelo fue incapaz de simular la redistribución en el perfil del suelo del N aportado con el fertilizante, tal y como se observó experimentalmente. En este caso, se atribuye el error a que en la parcela P-4 se produjo un transporte preferencial de la solución del suelo a través de las grietas que existían en dicho suelo (debido a su textura extremadamente arcillosa) y que el modelo fue incapaz de simular.

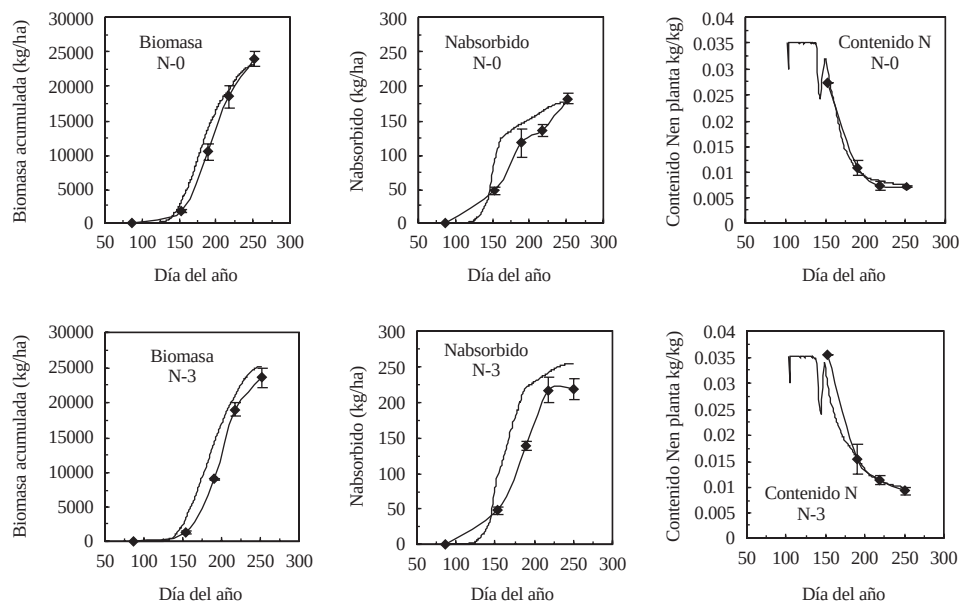


Fig. 3.—Curvas de evolución de la biomasa y el N acumulados por el cultivo y del contenido de N en planta, en la parcela P-3. Las notaciones N-0 y N-3 se refieren a los tratamientos nitrogenados con 0 UN y 300 UN aplicados en cobertura, respectivamente

Experimental and simulated results for biomass, crop N uptake and N content at site P-3. N-0 and N-3 are referred to nitrogen treatments with 0 and 300 kg N ha⁻¹ applied at sidedress, respectively

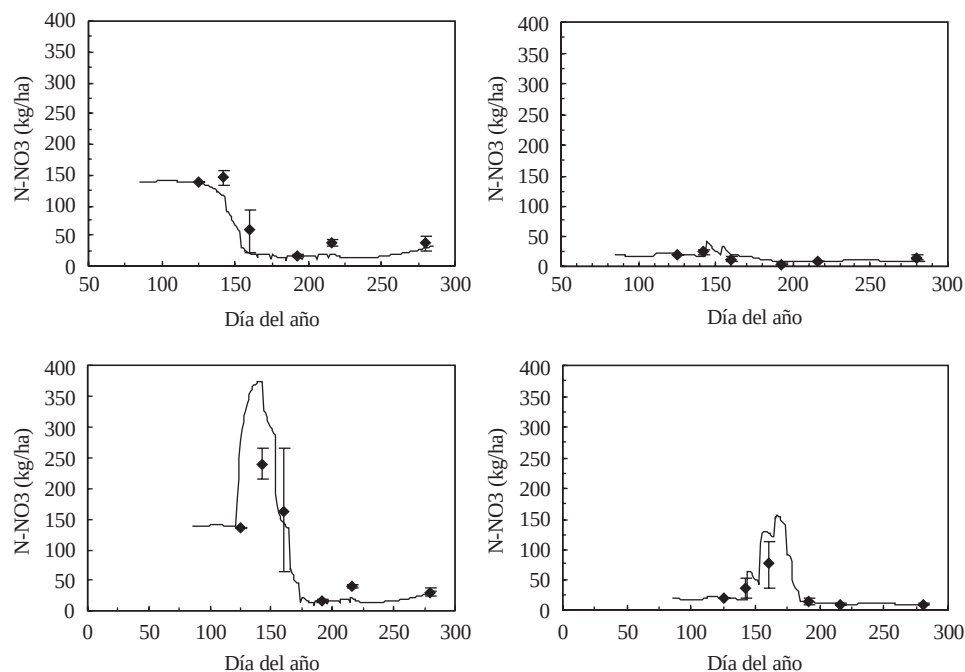


Fig. 4.—Evolución del perfil de N-NO₃ en el suelo durante el período de crecimiento, en la parcela P-3. A 60 cm se encuentra una capa de gravas y una capa freática. Únicamente se representan aquí los perfiles para el tratamiento control (N-0) y para el que recibió mayor dosis nitrogenada (N-3)

Soil N-NO₃ profiles during the growing period, at site P-3. At a depth of 60 cm there was a layer of gravels and phreatic water. Only the profiles for treatments N-0 and N-3 are showed

Con la finalidad de estudiar la posibilidad de utilizar CropSyst para estimar la cantidad de N requerida por el cultivo, se comparó la diferencia media entre los valores observados y simulados de N absorbido, que fue de 29 kg N ha⁻¹. La diferencia estuvo por debajo de los 30, 40 y 50 kg N ha⁻¹, en un 42, 68 y 84 % de las observaciones, respectivamente. La posible aplicación de CropSyst en la estimación del N necesario por el cultivo se tendría que analizar con cautela, con errores de unos 50 kg N ha⁻¹ en la mayoría de los casos.

Como se ha podido deducir del análisis realizado, la interpretación de los índices estadísticos dio poca información sobre la naturaleza de las discrepancias entre los datos experimentales y los simulados. El estudio de los gráficos dio mucha más información al usuario del modelo sobre la magnitud del error cometido, sobre su origen y sobre la fiabilidad en aplicaciones posteriores. El análisis gráfico es más cualitativo, pero da una mejor idea sobre si el origen de las discrepancias radica en el error experimental o en la incapacidad de simulación del modelo, así como permite discernir de forma más clara si este último es inherente al modelo o se debe a una mala parametrización o a la incertidumbre de los datos de entrada y las condiciones de inicialización. La utilización de índices estadísti-

cos sería de mayor interés en situaciones donde se desee realizar una preselección del modelo a utilizar, donde se quiera evaluar la capacidad predictiva de variables fácilmente medibles (ej.: rendimiento) en diferentes escenarios de suelo, clima, cultivo, manejo y localidad, y detectar de esta forma puntos débiles al modelo.

Finalmente, hay que señalar que la complejidad y variabilidad del sistema evaluado, con riegos abundantes, presencia de elementos gruesos en el suelo, presencia de capa freática poco profunda, suelos con grietas y flujo preferente, distinta fecha de siembra, distintos años climáticos y textura del suelo, hizo mucho más difícil y confusa la evaluación de un modelo complejo como CropSyst. Todos estos factores afectaron de algún modo a los componentes del balance de N y agua en el suelo y al crecimiento del cultivo. Asimismo, el experimento se realizó en parcelas comerciales, donde la variabilidad espacial y la incertidumbre sobre algunos de los datos de entrada incrementó el grado de dificultad en el proceso de evaluación. Es difícil conseguir un compromiso entre el esfuerzo para tener el máximo de medidas experimentales en una parcela, o tener un menor número de medidas en mayor número de parcelas, y así tener un mayor abanico de condiciones y factores.

CONCLUSIONES

Los datos experimentales disponibles permitieron una validación exhaustiva de la capacidad del modelo CropSyst para simular el balance de N en el sistema suelo-planta y la respuesta del crecimiento, en distintos tipos de suelo y año climático. Las distintas representaciones gráficas realizadas aportaron más información sobre la naturaleza y magnitud del error observado que el uso de los índices estadísticos.

CropSyst predijo correctamente la ocurrencia de los estadios de desarrollo. A nivel general, el modelo fue capaz de predecir de forma razonablemente correcta el rendimiento, biomasa y N absorbido en madurez fisiológica, aunque se observaron mayores discrepancias en los tratamientos con fertilización cero (N-0).

De los análisis más detallados se pudo constatar que CropSyst simuló razonablemente la demanda de N por el cultivo y la respuesta del crecimiento al N absorbido. Las divergencias observadas permitieron detectar errores inherentes al modelo referentes a la insensibilidad del índice de cosecha a la falta de N y referentes a la simulación del movimiento de agua y nitratos en el suelo. En este último caso, el modelo necesita una exploración más detallada de su capacidad de simulación en situaciones donde hay flujo preferencial, elementos gruesos y capa freática. Otros errores atribuibles al modelo estuvieron más relacionados con errores en la estimación de ciertos parámetros que afectan el ritmo de acumulación de biomasa y N, así como con la difícil estimación del N aplicado con el agua de riego, y con la variabilidad espacial no considerada de los perfiles iniciales de N-NO₃ en el suelo. De igual manera, la evaluación del modelo tiene que considerar el error experimental de las variables comparadas, que en el peor de los casos explicó un 30 % del error total. De cara a las aplicaciones de CropSyst en la estimación de la cantidad de N requerida por el cultivo, en un 84 % de los casos el error cometido por el modelo fue inferior a 50 kg ha⁻¹.

Para el uso general del modelo en la zona, se requieren más datos experimentales para acabar de refinar ciertos aspectos del modelo, en concreto los referidos a la simulación del movimiento de agua y nitratos en el suelo para condiciones de flujo preferente (suelo con grietas), presencia de elementos gruesos y capa freática.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha sido subvencionado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) (Expediente 95/0028). Los autores agradecen la colaboración del Dr. Pere Villar y del Sr. Miguel Arán del Laboratorio de Análisis y Fertilidad de Suelos de Sidamon.

SUMMARY

Evaluation of CropSyst, a cropping systems simulation model, for irrigated corn in the Ebro Valley

Previously to the application of the cropping systems simulation model CropSyst to assess nitrogen fertilization practices in the irrigated area of the Urgell Channel (Lleida, Catalonia, Spain), an exhaustive evaluation of the model was performed for corn (*Zea mays* L.) in the specific conditions of the area. In this study, the results from the simulations were compared to the field measurements obtained from an experiment with increasing N fertilizer rates, as referred to crop growth variables and water and nitrogen dynamics in the soil-plant system. CropSyst predicted well the dates of the occurrence of development stages. In general, the model was able to simulate reasonably well, grain yield, and accumulated biomass and nitrogen at physiological maturity, even though some discrepancies were observed for the control treatments (N-0, none N at sidedress). A more detailed analyses of the data, showed that CropSyst did a good job in simulating crop N demand and growth response to N supply. The observed differences were attributed to some model limitations, regarding the inability of the model to simulate the reduction of the harvest index to N shortage and to some problems associated to the simulation of water and N transport within the soil. Other errors were more related to the estimation of some specific crop parameters that affect the accumulation of biomass and N by the crop, the uncertainty of the N loads delivered by the irrigation water, and the spatial variability of the initial NO₃-N profiles in the field that could not be taken into consideration.

KEY WORDS: Evaluation of a simulation model
CropSyst
Corn
Nitrogen fertilization

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADDISCOTT T.M., SMITH J., BRADBURY N., 1995. Critical evaluation of models and their parameters. J. Environ. Qual. 24, 803-807.
- ADDISCOTT T.M., WHITMORE A.P., 1987. Computer simulation of changes in soil mineral nitrogen and crop nitrogen during autumn, winter and spring. J. Agric. Sci. Camb. 109, 141-157.
- CAMPBELL G.S., 1985. Soil physics with Basic: Transport models for soil-plant systems. Developments in soil science No. 14. Elsevier, New York. 150 pp.
- CATE R.B., NELSON L.A., 1971. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation into two classes. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 35, 658-660.
- DONATELLI M., STOCKLE C.O., CEOTTO E., RINALDI M., 1997. Evaluation of CropSyst for cropping systems at two locations of northern and southern Italy. European Journal of Agronomy 6, 35-45.
- FERRER F., 1999. Diagnóstico del N disponible en el suelo y contribución de técnicas de simulación para la mejora de las recomendaciones de la fertilización nitrogenada en cultivo de maíz en regadío. Tesis Doctoral. Universitat de Lleida, Lleida.
- FERRER F., VILLAR J.M., VILLAR P., ARAN M., STOCKLE C.O., 1997a. Impacto del nitrógeno presente en el agua de riego en la zona regable del Canal d'Urgell. VII Congreso de Riegos y Drenajes, Lleida, 25-27 junio 1997. pp. 241-248.
- FERRER F., VILLAR J.M., VILLAR P., ARAN M., STOCKLE C.O., 1997b. Analyzing environmental side effects derived from applying recommended N fertilizer rates based on the N-min method with a cropping

- systems simulation model. Proceedings of the 11th International World Fertilizer Congress, Gent, Bélgica, 7-13 septiembre 1997, pp. 277-284.
- HARRISON S.R., 1990. Regression of a model on real-system output: an invalid test of model validity. *Agricultural Systems*, 183-190.
- LOAGUE K., GREEN R.E., 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. *J. Contam. Hydrol.*, 7, 51-73.
- PALA M., STOCKLE C.O., HARRIS H.C., 1996. Simulation of Durum Wheat (*Triticum aestivum* ssp. Durum) Growth under Different Water and Nitrogen Regimes in a Mediterranean Environment using CropSyst. *Agricultural Systems* 51, 147-163.
- SAXTON K.E., RAWLS W.J., ROMBERGER J.S., PAPENDICK R.I., 1986. Estimating generalized soil water characteristics from texture. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 50(4), 1031-1036.
- STOCKLE C.O., CABELGUENNE M., DEBAEKE P., 1997. Comparison of CropSyst performance for water management in southwestern France using submodels of different levels of complexity. *European Journal of Agronomy* 7, 89-98.
- STOCKLE C.O., DEBAEKE P., 1997. Modeling crop nitrogen requirements: a critical analysis. *European Journal of Agronomy* 7, 161-169.
- STOCKLE C.O., MARTIN S.A., CAMPBELL G.S., 1994. CropSyst, a cropping Systems Simulation Model: Water/Nitrogen Budgets and Crop Yield. *Agricultural Systems* 46, 335-359.
- STOCKLE C.O., NELSON R.L., 1998. CropSyst User's Manual. Biological Systems Engineering Dept., Pullman, Washington, USA, Washington State University.
- VILLAR P., STOCKLE C.O., VILLAR J.M., 1996. Long-term evaluation of corn yield and nitrogen leaching in the irrigated area of the Urgell's Channel, Spain. IV European Society of Agronomy Congress, Veldhoven, Wageningen, The Netherlands, 7-11 July 1996, 37-38.
- WHITMORE A.P., 1991. A method for assessing the goodness of computer simulation of soil processes. *Journal of Soil Science*, 42, 289-299.
- WILLMOTT C.J., 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin American Meteorological Society*, Vol. 63, No. 11, 1309-1313.

ANEXO I

Índices estadísticos utilizados en la evaluación del modelo

Índices estadísticos propuestos por Whitmore (1991)

- Suma de cuadrados de los Residuales (SCR)

$$SCR = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{n_j} (O_{ij} - S_j)^2$$

- Suma de cuadrados del Error Experimental (SCE)

$$SCE = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{n_j} ((O_{ij} - S_j) - (\bar{O}_j - S_j))^2$$

- Suma de cuadrados del Error de Simulación (SCS)

$$SCS = \sum_{j=1}^N n_j (\bar{O}_j - S_j)^2$$

Donde, N es el número de tratamientos, n_j es el número de repeticiones por tratamiento, S_j el valor simulado para el tratamiento j y O_{ij} es la medida i del tratamiento j. es el valor promedio observado para el tratamiento j.

Índices estadísticos propuestos por Willmott (1982)

- Raíz de la diferencia de cuadrados media (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (S_j - O_j)^2}{N}}$$

- Suma de cuadrados media del Error Sistemático (MSE_s)

$$MSE_s = N^{-1} \sum_{j=1}^N (\hat{S}_j - O_j)^2$$

- Suma de cuadrados media del Error No-Sistemático (MSE_u)

$$MSE_u = N^{-1} \sum_{j=1}^N (S_j - \hat{S}_j)^2$$

donde, $\hat{S}_j = a + bO_j$

- Índice de concordancia (d)

$$d = 1 - \frac{\sum_{j=1}^N (S_j - O_j)^2}{\sum_{j=1}^N (|S'_j| + |O'_j|)^2}$$

donde, y $|S'_j| = P_j - \bar{O}$ y $|O'_j| = O_j - \bar{O}$

Índices estadísticos propuestos por Loague and Green (1991)

- Eficiencia del modelo (EF)

$$EF = \frac{\sum_{j=1}^N (O_j - \hat{O})^2 - \sum_{j=1}^N (S_j - O_j)^2}{\sum_{j=1}^N (O_j - \hat{O})^2}$$

