



Universitat de Lleida

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

Francesc Ferrer Alegre

TESIS DOCTORAL

Junio 1999

(043) "1999" FER

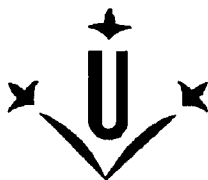
1600190688X

 Universitat de Lleida
Registre General

17 MAIG 1999

2093

S:



Universitat de Lleida

*Departament de Medi Ambient i
Ciències del Sòl*

Diagnóstico del N disponible en el suelo y contribución de técnicas de simulación para la mejora de las recomendaciones de fertilización nitrogenada en cultivo de maíz en regadío



Memoria presentada por
Francesc Ferrer Alegre

Para optar al título de Doctor Ingeniero Agrónomo

Director de Tesis: **Dr. Josep M. Villar Mir**. Universitat de Lleida
Co-Director de Tesis: **Dr. Claudio O. Stockle**. Washington State University

Director de Tesis

Co-Director de Tesis

Doctorando

Lleida, Junio 1999

1804-85860

0147-37060

A la memòria de la Mare i de l'Àvia

i també d'en Jesús, en John i en Quique.

AGRADECIMIENTOS

POR FIN !!! Por fin puedo liberar mi cerebro y mis cansados ojos de tantos días de esclavitud científica y tedioso tecleto, y dejar un espacio al corazón en el pequeño apartado de agradecimientos y jabones varios (bien merecidos, por cierto). Quizá por esto sean las páginas más leídas de cualquier tesis doctoral, dónde con un poco de suerte se puede descubrir algún cotilleo y dónde, de forma escueta y espero que no empalagosa, el autor recorre mentalmente todo el itinerario humano con el que ha sembrado sus últimos cuatro años. Si el lector/a detecta en el texto cualquier irreverencia, falta de seriedad o entrevé algún exceso de confianza poco disimulado, que no dude en comunicármelo cuanto antes, no sea que me encuentren ya en plena celebración. Ah, por cierto, tendrá que acreditarse cómo Doctor a efectos legales. No me entretengo más, sólo desear a los valientes lectores/as que emprendan la lectura de la tesis (ni que sólo sea la cubierta y las páginas con números romanos), que la presente tesis les sea de utilidad.

Sin duda alguna, el abrazo más cálido va dirigido a Josep Maria Villar, amigo y Director de Tesis, que con su cerebro multi-tasca, sus pilas alcalinas y su dominio de las situaciones multi-espacio-temporales consiguió exprimir tiempo de su pulverizada agenda y salpicar con brillantes ideas y comentarios esta tesis. Sin su confianza, su amistad y su empeño, no se habría ni escrito el título de esta tesis: gràcies per tot !

El segundo en la lista, es ni más ni menos que el famoso Dr. Claudio O. Stockle, Co-Director de Tesis y principal responsable de CropSyst (¿Cómo? ¿Todavía no conoce CropSyst?). Haber trabajado con él ha sido un privilegio y una gran suerte para mí, a parte de la gran amistad que compartimos. Ya sabes que mi casa es tu casa.

A los incansables Miquel Arán y Pere Villar, del Laboratori d'Anàlisi i Fertilitat de Sòls (Sidamón), usuarios finales de todo este trabajo y a los cuales siempre me escucho con gran atención (incluso cuando hablan de la fertilización nitrogenada). Igualmente, un mensaje de gratitud a los trabajadores del LAF, a los cuales les encantaba verme llegar cargado de muestras.

A los compañeros de la ONG "Precarios Sin Fronteras" (Asun, Francesc D., Elena, August, Mikel, Joan y Israel) sin los cuales el DMACS sería muy aburrido y con los cuales ha existido una complicidad absoluta. Molta sort a tots.

A los PFC_{eros} y TPT_{eros} que tuvieron que trabajar bajo mi duro látigo (Belén, Jaume, Israel y Rosa), que alegraron los días de campo y que ya corren sueltos por el mundo.

A los compañeros de café, paella, seminarios y otras cosas serias del Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl, por su ayuda y compañía. En especial a la Clara, que con sus chistes matutinos y su paciencia alegró muchas de esas mañanas con niebla.

Al Sr. Jaume Boixadera, la Carmen Herrero y personal de la Secció d'Avaluació de Recurso i Noves Tecnologies del Departament d'Agricultura Ramaderia i Pesca de la Generalitat de Catalunya por dejarme utilizar el mapa de suelos digitalizado de la zona de Bellvís y por ayudarme a interpretar la información de suelos.

Al Dr. Carlos Cantero y al Dr. Jaume Lloveras por orientarme en el diseño de los experimentos de campo. A Maria y Andrea del IRTA.

Al “gurú” de la estadística, Dr. Ignacio Romagosa, al que no le salieron pelos blancos cuando le enseñe el análisis estadístico de los datos de campo.

A los agricultores que aceptaron que les llenara el campo de estacas y que les incordiará con mis experimentos. J.R. Arderiu (Bellvís), F. Costa (Vallverd), F. Ortiz (Linyola), J. Piulats (Bellvís), S. Riera (Linyola) y Cooperativa de Bellvís.

A los ADV_{eros} de la zona por contestar mis preguntas telefónicas. Por suerte no me llamo Edu.

Al Sr. Salvador Arqué, Xavi Díaz y Antoni Soliva de la Casa Canal de Mollerusa por atenderme tan amablemente.

A la CIRIT, patrocinadores míos durante estos cuatro años.

A la Paquita y demás chicas de la oficina de “tercer cicle” por tener que luchar con la burocracia y con nuestros despistes.

A Joana y August, amigos entrañables, que me dejaron utilizar la habitación de los invitados, que me iniciaron en el mundo del yogourt y con los que compartí agradables comidas mientras hablábamos de cómo cambiar el mundo.

A la Montse, que hace que la biblioteca de agrónomos sea la más cálida y viva del planeta. Ella representa una brújula para mí.

A la gente de Pullman y Moscow (Esther, Wayne, Nicky, Praveen, Kyong y Sir Roger Nelson), por hacerme sentir cómo en casa, por ser mi segunda familia y por compartir sueños.

A todos los amigos y amigas, muchos repartidos por el planeta, que sin su compañía y su referencia la vida sería miserable.

Al Pau, Marc i Mariona, andami de tot. A les respectives i respectius (Fela, Liz i Jordi) i a totes les tietes, tiets cosinets i cosinetes.

A l’Avi i a la Iaia amb els quals he compartit els moments més agradables des de la tranquil·litat de l’hort d’Esplugues.

Al Pare, que segur que estarà més content que jo, per deixar-nos ser com som i per contagiar-nos aquest esperit lluitador i inquiet.

A Rie Chan, torrente de vida, ímpetu, inspiración y fuente de vida.

RESUMEN

El presente estudio contribuyó, en su medida, a un mejor conocimiento de la dinámica del N en el suelo y de su aprovechamiento por el cultivo de maíz, en las condiciones de regadío de los Canales de Urgell (Lleida). Este conocimiento es básico para la mejora de las prácticas de fertilización N, teniendo en cuenta criterios productivos y medio ambientales. En concreto, se profundizó en la evaluación del potencial del análisis del contenido de N-NO₃ en los primeros 30 cm del suelo en pre-cobertera (PSNT), cómo índice del N disponible en el suelo y herramienta que permita identificar parcelas con necesidad de aplicaciones suplementarias de fertilizante N. En concreto, se identificó un intervalo para el nivel de PSNT crítico (0-30 cm) de 70 a 100 kg N-NO₃ ha⁻¹ (15 a 22 g N kg⁻¹). Paralelamente, se evaluó, de forma exhaustiva, la capacidad del modelo de simulación CropSyst para simular la dinámica del N en el sistema suelo-planta y el crecimiento del cultivo. Una vez valoradas las limitaciones y la capacidad de simulación del modelo, se procedió al estudio de la evaluación de los efectos del tipo de suelo y de la variabilidad climática inter-anual sobre el comportamiento y el uso del PSNT, a nivel de parcela y en un ámbito regional. En este sentido, se definió un valor de PSNT crítico (para separar parcelas con y sin respuesta a la fertilización N), en función del nivel de riesgo aceptado (probabilidad que exista un año con un PSNT crítico mayor), y para dos suelos contrastados de la zona. Además, al comparar los tres sistemas de recomendación de la dosis N, se identificó la profundidad de suelo como el factor más determinante para explicar diferencias entre los diferentes suelos de la zona. Los efectos de la variabilidad inter-anual sobre el rendimiento, la cantidad de N aplicada y el N lixiviado fueron parecidos para los tres sistemas de recomendación.

ÍNDICE	PÁGINA
AGRADECIMIENTOS	i
RESUMEN	iii
ÍNDICE	vi
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
2. OBJETIVOS	9
3. CAPÍTULO I. Diagnóstico del contenido de N-NO ₃ en el suelo en pre- cobertera para el cultivo de maíz en regadío CHAPTER I. Field evaluation of a Pre-sidedress Soil Nitrate Test for irrigated corn on calcareous soils	11
3.1. Introduction	12
3.2. Material and Methods	16
3.3. Results and Discussion	22
3.4. Conclusions	38
4. CAPÍTULO II. Evaluación del modelo de simulación CropSyst para maíz en condiciones de regadío del Valle del Ebro	42
4.1. Introducción	43
4.2. Material y Métodos	44
4.3. Resultados y Discusión	52
4.4. Conclusiones	60
5. CAPÍTULO III. Análisis a nivel de parcela y regional de sistemas de recomendación de la dosis de fertilizante N utilizando un modelo de simulación y un SIG	

CHAPTER III. Assessing field and regional nitrogen fertilizer recommendations for corn using a cropping systems simulation model and GI S	63
5.1. Introduction	64
5.2. Material and Methods	67
5.3. Results and Discussion	72
5.4. Conclusions	84
6. CONCLUSIONES GENERALES	88
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
8. ANEJOS	
ANEJO I. ÍNDICES ESTADÍSTICOS UTILIZADOS EN LA EVALUACIÓN DEL MODELO.	
ANEJO II. PRÁCTICAS USUALES DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN LA ZONA	
ANEJO III. ANALYZING ENVIRONMENTAL SIDE EFFECTS DERIVED FROM APPLYING RECOMMENDED N FERTILIZER RATES BASED ON THE N-min METHOD WITH A CROPPING SYSTEMS SIMULATION MODEL.	
ANEJO IV. IMPACTO DEL NITROGENO PRESENTE EN EL AGUA DE RIEGO EN LA ZONA REGABLE DEL CANAL DE URGELL.	
ANEJO V. MAPA DE LOCALIZACIÓN DE LAS PARCELAS EXERIMENTALES.	

ÍNDICE DE TABLAS	PÁGINA
Chapter I	
Table 1.1. Soil characteristics of the Ap horizon and principal site characteristics	16
Table 1.2. Management practices	17
Table 1.3. Calendar of irrigation events	18
Table 1.4. Soil sampling calendar	18
Table 1.5. Biomass sampling calendar	19
Table 1.6. Dates of development stage occurrence.	23
Table 1.7. Soil NO ₃ -N content (kg NO ₃ -N ha ⁻¹) in the profile taken at Pre-planting and Pre-sidedressing	24
Table 1.8. Estimated N mineralization amounts (kg N ha ⁻¹) from the mass balance equation in the N ₀ treatments	29
Table 1.9. N content, N uptake, Grain Yield, Biomass, Harvest Index and soil residual NO ₃ -N levels (rooting zone) for the N rate treatments	32
Capítulo II	
Tabla 2.1. Características de los suelos utilizadas en las simulaciones (0-30 cm)	46
Tabla 2.2. Parámetros de cultivo utilizados en las simulaciones	48
Tabla 2.3. Índices estadísticos para evaluar los resultados de la simulación .	53
Chapter III	
Tabla 3.1. Characteristics of the SCL and the SL soils considered	69
Tabla 3.2a. Description and percentage of the covered area of the digitized map, for the soil groups used in the simulations	70
Tabla 3.2b. Soil characteristics associated to the texture classes for the surface horizon, considering absence of coarse elements	70
Table 3.3a. Probability of error when identifying responsive and non-responsive fields depending on the measured PSNT level for the Loam Soil (L)	76
Table 3.3b. Probability of error when identifying responsive and non-responsive fields depending on the measured PSNT level for the Silty Clay Loam Soil (SCL)	76
Table 3.4. Global long-term average values of simulated Grain yield, N applied, crop N uptake, and N leached below the rooting depth	78
Table 3.5. Long-term Average Grain yield and N leaching amounts for the Soil Groups, sorted according their effective soil depth and with the corresponding percentage of the total covered area	79

ÍNDICE DE FIGURAS

PÁGINA

Chapter I

Figure 1.1. Measured monthly-accumulated precipitation and monthly average daily mean temperature for 1996 and 1997 22

Figure 1.2. Temporal evolution of soil NO₃-N distribution within the profile for the highest N sidedress fertilizer treatment, N-3 (300 UN) 25

Figure 1.3. Temporal evolution of soil NO₃-N distribution within the profile in experiment P-4 26

Figure 1.4. Observed relationships among yield, residual NO₃-N and available N at pre-sidedressing (sidedress N fertilizer + N_{ini}, rooting zone) 28

Figure 1.5. Aboveground N uptake accumulation by corn for P-2 (1996) and P-4 (1997) sites 31

Figure 1.6. Observed relationship between N content in the grain and yield (a), and between Plant N Uptake and N content in the grain (b), for all the plots 34

Figure 1.7. Observed relationship between Plant N Uptake and available N at pre-sidedressing (sidedress N fertilizer + soil NO₃-N in the rooting zone) 35

Capítulo II

Figura 2.1. Valores simulados vs. datos observados de rendimiento (a), biomasa final (b) y N absorbido por el cultivo (c) 52

Figura 2.2. Relación entre biomasa final y N absorbido por el cultivo. Datos observados y simulados 55

Figura 2.3. 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 los tratamientos nitrogenados con 0 UN y 300 UN aplicados en cobertera, respectivamente 57

Figura 2.4. Evolución del perfil de N-NO₃ en el suelo durante el periodo 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) 57

Chapter III

Figure 3.1. N fertilizer applied at pre-planting for each of the recommendation systems as a function of the PPNT level 71

Figure 3.2a. Variation of yearly simulated maximum yield, accumulated precipitation during the growth period and critical PSNT for N fertilizer crop response. Loam Soil (L) 71

Figure 3.2b. Variation of yearly simulated maximum yield, accumulated precipitation during the growth period and critical PSNT for N fertilizer crop response. Silty Clay Loam soil (SCL) 74

Figure 3.3. Cumulative probability graph of critical PSNT values from the thirty simulated crop seasons	75
Figure 3.4. Long-term average grain yield for the soil groups developed on calcareous deposits (B-1 to B-6-7). Plotted bars represent 20 and 80-percentile values for grain yield	80
Figure 3.5. Long-term average N leaching yield for the soil groups developed on calcareous deposits (B-1 to B-6-7). Plotted bars represent 20 and 80-percentile values for N leached through the growing season	80
Figure 3.6a. Simulated long-term average N leaching maps for each soil group and for FIX DOSE recommendation system. Numbers in the legend are in $\text{kg NO}^3\text{-N ha}^{-1}$	83
Figure 3.6b. Simulated long-term average N leaching maps for each soil group and for BALANCE BASED recommendation system. Numbers in the legend are in $\text{kg NO}^3\text{-N ha}^{-1}$	83
Figure 3.6c. Simulated long-term average N leaching maps for each soil group and for PPNT _{crit} BASED recommendation system. Numbers in the legend are in $\text{kg NO}^3\text{-N ha}^{-1}$	84

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Los objetivos de unas Buenas Prácticas de Manejo (BPM) para la fertilización nitrogenada son, asegurar un nivel de N en el suelo no restrictivo para la producción, conseguir un uso eficiente del N por el cultivo y evitar así sus efectos perjudiciales para el medio ambiente, y mejorar la rentabilidad de la explotación. La necesidad de encontrar BMP, para mejorar la fertilización N es especialmente importante en el actual contexto mundial, dónde los precios de la mayoría de los productos agrícolas más básicos han disminuido de forma continuada en los últimos años.

La zona semiárida de los Canales de Urgell está situada en la parte más oriental del Valle del Ebro, con suelos desarrollados sobre calci-lutitas, areniscas y depósitos aluviales calcáreos. La zona se riega desde hace aproximadamente ciento treinta años, y en la actualidad ocupa unas 72.000 ha. El riego por superficie es el sistema predominante en la zona, regando por turnos desde mediados de Marzo hasta principios de Septiembre dependiendo del año. La presencia de acuíferos superficiales en los materiales cuaternarios y aluviales, ha llevado al gobierno autonómico de Catalunya a la definición, en la zona, de formaciones sensitivas a la contaminación de N-NO₃ por actividades agrícolas (DOGC, 1998a). El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los principales cultivos de la zona (22% del área), típicamente en rotación con trigo de invierno (*Triticum aestivum* L.) y alfalfa (*Medicago sativa* L.). Los rendimientos medios para el maíz oscilan entre 9 y 14 t ha⁻¹ (14% humedad). Las dosis usuales de fertilizante N aplicadas superan en general los 300 kg N ha⁻¹, aplicándose un 40% en pre-siembra en forma de complejo nítrico/amónico y el resto se aplica justo antes del estadio de seis hojas (6V) en forma de nitrato amónico.

Conforme a estudios previos (Villar y col.,1996; Ballesta y Lloveras, 1996) las dosis aplicadas normalmente por los agricultores están por encima de las necesidades reales del cultivo de maíz. En total, llegan a representar alrededor del 45% de las aplicaciones de N en el área. Las altas dosis aplicadas en el cultivo del maíz son, en primer lugar, una consecuencia del bajo coste de los fertilizantes y de la actitud del agricultor que asocia altas dosis de N con altos rendimientos y rentabilidad. En segundo lugar, el sistema actual de recomendación se basa en las extracciones de N asociadas a un objetivo de cosecha, sin tener en cuenta muchas veces el N disponible en el suelo (N-NO₃ residual + N mineralizado). Finalmente, la falta de experimentos de campo que permitan calibrar niveles del N disponible en el suelo, hace que los técnicos tiendan a recomendar dosis de fertilizante N elevadas para evitar posibles situaciones de carencia de N durante el ciclo de cultivo.

La combinación de altas dosis de fertilizante N aplicadas con fracciones aparentes de recuperación para el maíz entorno al cincuenta por ciento (Keeney, 1982 citado por CLRSWC, 1993) y con la contribución por la mineralización de la materia orgánica, contribuyen a una presencia importante de N-NO₃ en el suelo (en cosecha o cuando la absorción por el cultivo es baja), incrementando el potencial para su transporte por debajo de la profundidad radicular. La presencia en la zona de una capa freática poco profunda en algunas posiciones geomorfológicas y volúmenes importantes de drenaje durante otoños y inviernos lluviosos y en los primeros riegos al principio del ciclo de cultivo, conduce a la detección de elevados contenidos de nitratos en los freáticos superficiales y en aguas subterráneas (Ferrer y col., 1997a). El mismo estudio indica contenidos promedio de NO₃ de 70 mg NO₃ L⁻¹ en agua extraída de pozos (de 1 a 10 m de profundidad) y de 35 mg NO₃

L⁻¹ en los canales de drenaje (azarbes). Algunos de estos valores están muy por encima de la concentración máxima permisible por la normativa de la Unión Europea 50 mg NO₃ L⁻¹ (Council of the European Communities (1980) citado por Addiscott y col., 1991). Estudios en otras áreas del mundo donde se cultiva maíz de forma intensiva encuentran situaciones parecidas: CLRSWC (1993), Neeteson (1995), Plénet (1995), Zhang y col. (1996), Varela (1991) citado por Ramos (1996) y Roman y col. (1996).

En este contexto, es obvio de que hay la necesidad de aplicar medidas preventivas que consideren la mejora de las prácticas de la fertilización N en la zona y principalmente, el desarrollo de un procedimiento para calcular correctamente la dosis de fertilizante N a aplicar a nivel de parcela. Para el ajuste de la dosis de fertilizante N a las necesidades del cultivo hay que considerar todas las fuentes de N en el sistema (fijación de N por leguminosas, mineralización neta, riego y inclusive el aporte por el agua de lluvia) y estableciendo objetivos de cosecha realistas (CLRSWC, 1993). Otras prácticas de la fertilización N que se pueden mejorar para aumentar la eficiencia en el uso del N aplicado son: sincronización de las aplicaciones a la demanda del cultivo, tipo de fertilizante y la localización y método de aplicación.

El uso de técnicas de análisis para estimar el N disponible en el suelo y las dosis de fertilizante N a aplicar, puede ser una herramienta de gran utilidad y que ha servido en muchos casos a reducir la cantidad de fertilizante N empleada. La reducción de las dosis de N ha sido constatada por varios autores como una de las acciones más eficaces a la hora de reducir la contaminación de las aguas por nitratos sin que se vean reducidos los rendimientos, en diferentes sistemas de cultivo y condiciones: Magdoff y col. (1984),

Sexton y col. (1996), CLRSWC (1993), Neeteson (1989) y Caballero y col. (1996). Cada parcela se puede considerar un escenario específico definido por el tipo de suelo, el sistema de cultivo, las condiciones climáticas, su posición en el paisaje y la geología del subsuelo. Esta combinación de factores determinará la relación entre el N disponible en el suelo, el fertilizante aplicado, la respuesta del cultivo y la presencia de nitratos en las aguas sub-superficiales. Los aspectos de manejo que más implicaciones tienen en la eficiencia del uso de N y el balance de N en un sistema de cultivo son: la rotación de cultivo con leguminosas, los cultivos de cobertura o de entre-temporada, el manejo de los residuos de cosecha, el sistema de laboreo y el sistema y manejo del riego.

Recientemente, el principal laboratorio de análisis de suelos de la zona (Laboratorio de Análisis y Fertilidad de suelos, LAF en Sidamon) ha incorporado en su programa el análisis del contenido de N-NO₃ de los primeros 30 cm del suelo en pre-siembra. La dosis N que se recomienda en este caso, se calcula restando la medida obtenida en el suelo de N-NO₃ de las extracciones de N del cultivo esperadas. Sin embargo, este balance simplificado no se basa en una calibración rigurosa en campo. Paralelamente, el Gobierno de Catalunya ha definido unas BPM para la zona con el objeto de regular las prácticas de la fertilización N (DOGC, 1998b). Desde 1993, el Laboratorio de Análisis de Suelo y Fertilidad de Suelos (LAF) en colaboración con el Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl de la Universitat de Lleida han llevado a cabo experimentos con dosis de fertilizante N en parcelas comerciales, con el objetivo de desarrollar y calibrar la determinación del N-NO₃ y evaluar el N disponible en el suelo y las necesidades de fertilizante N.

En este estudio se pretende adaptar el análisis del contenido de N-NO₃ en el suelo, en el momento de pre-cobertera (PSNT, Presidedress Soil Nitrate Test), tal y cómo fue originalmente descrito por Magdoff y col. (1984) y Magdoff (1991a), a las condiciones específicas del cultivo de maíz en el área de estudio (suelos calcáreos, riego de superficie por turnos y condiciones semiáridas). Este método utiliza la medida del contenido de N-NO₃ antes de aplicar el fertilizante N de cobertera (normalmente en el estadio de 5-6 hojas), en los 30 cm superficiales del suelo, como un índice del N disponible y de ajuste de las dosis de fertilizante N a aplicar. La asunción y ventaja del PSNT, es que el contenido de N-NO₃ en el horizonte Ap, medido justo antes del periodo de máxima absorción de N por el cultivo refleja el N mineral residual de la anterior campaña más el N mineralizado durante el periodo inicial de desarrollo del cultivo (Marzo a Junio), para diferentes condiciones de suelo, clima y manejo (Magdoff, 1991b). En la actualidad, el PSNT se usa en el cultivo de maíz en las principales zonas del cinturón del maíz (Corn belt) de EEUU, Magdoff y col. (1984), Hergert (1987), Binford y col. (1992) y Schmitt y Randall (1994). En Europa, adaptaciones del método se conocen con el nombre del *Método del N_{min}* (referente a N mineral), y es utilizado para diferentes tipos de cultivo (Neeteson, 1995).

En el presente estudio, la evaluación del PSNT requirió de experimentos de campo con diferentes dosis de fertilizante N en los principales tipos de suelo de la zona y durante varios años. El seguimiento de los perfiles de N-NO₃ en el suelo, la acumulación de biomasa y N por el cultivo y la medida del rendimiento final, permiten hacer reajustes en los procedimientos metodológicos (momento y profundidad de muestreo), estimar los componentes principales del balance de N y evaluar las posibilidades del análisis como índice de disponibilidad de N en el suelo y de ajuste de la dosis de N a aplicar. La

experimentación de campo permite además, investigar el efecto de las características del suelo, de las condiciones climáticas, de aplicaciones de fertilizante N en pre-siembra y de prácticas de manejo sobre el comportamiento del PSNT y el aprovechamiento del N por parte del cultivo.

En general, el método es válido para las condiciones promedio existentes en la zona. Cuando se aplica a escenarios particulares, las recomendaciones hechas sobre la base del PSNT serán más o menos ajustadas dependiendo del tipo de suelo, material vegetal año climático y las prácticas de manejo existentes. Además, es difícil estimar el impacto ambiental debido al movimiento del N-NO₃ acumulado en el suelo (Neeteson, 1995). Con el propósito de superar estas limitaciones, la utilización de modelos de simulación de sistemas agrícolas puede ser de gran utilidad. Existen en la actualidad modelos que permiten representar y evaluar el balance de N, estimando en base diaria el N mineral presente en el suelo, el N lixiviado, la absorción N y la respuesta del crecimiento. En el estudio se utilizó el modelo de sistemas agrícolas CropSyst Suite (Stockle y Nelson, 1998), que permite simular varios cultivos durante varios años, con un intervalo de ejecución diario e incluyendo una variedad de opciones agronómicas de manejo y con la posibilidad de realizar análisis de impacto ambiental. La combinación del modelo con un generador climático y un Sistema de Información Geográfica (SIG) permite evaluar a nivel regional y de parcela, las consecuencias sobre la productividad, el uso del N por el cultivo y la pérdida de N por lixiviación de diferentes opciones para el cálculo de la dosis de fertilizante N a aplicar. Previamente a la aplicación del modelo, se realizó una parametrización rigurosa del modelo y se compararon los datos experimentales disponibles

con los resultados del modelo con el fin de validar el comportamiento del modelo para las condiciones de la zona.

El documento se ha organizado en tres capítulos:

CAPÍTULO I. Diagnóstico del contenido de N-NO₃ en el suelo en pre-cobertera para el cultivo de maíz en regadío.

CAPÍTULO II. Evaluación del modelo de simulación CropSyst para maíz en condiciones de regadío del Valle del Ebro.

CAPÍTULO III. Análisis a nivel de parcela y regional de sistemas de recomendación de la dosis de fertilizante nitrogenado utilizando un modelo de simulación y un SIG.

2. OBJETIVOS

2. OBJETIVOS

CAPÍTULO I

1. Caracterización de la evolución temporal del perfil de N-NO₃ en el suelo, el crecimiento y la acumulación de N por parte del cultivo, así como la contribución de la mineralización del nitrógeno orgánico.
2. Evaluación de los efectos que tienen variaciones en el tipo de suelo, condiciones climáticas y prácticas de manejo sobre el nitrógeno disponible en el suelo, el comportamiento del PSNT y las pérdidas de N-NO₃ por lavado.
3. Análisis del potencial del PSNT como herramienta de diagnóstico del nitrógeno disponible en el suelo y de recomendación de la dosis de fertilizante N a aplicar.

CAPÍTULO II

4. Parametrización y validación del modelo de simulación CropSyst para las condiciones de la zona.

CAPÍTULO III

5. Valoración de los efectos que provocan variaciones en el tipo de suelo y las condiciones climáticas sobre el nivel de PSNT crítico para obtener respuesta a la aplicación de fertilizante nitrogenado.
6. Análisis de los efectos a largo plazo y a nivel regional de tres sistemas de recomendación de la dosis de fertilizante nitrogenado a aplicar mediante técnicas de simulación.

3. CHAPTER I. Field evaluation of a Pre-Sidedress Soil Nitrate Test (PSNT) for irrigated corn on calcareous soils.

3. FIELD EVALUATION OF A PRE-SIDEDRESS SOIL NITRATE TEST (PSNT) FOR IRRIGATED CORN ON CALCAREOUS SOILS

Abstract

The present study evaluates the use of the Pre-Sidedress Soil Nitrate Test (PSNT) as a management tool for assessing soil N availability and adjusting nitrogen fertilizer rates for corn in the irrigated area of the Urgell Channels. A 2-year N rate response experiment was conducted and NO₃-N soil profiles, crop growth, N accumulation by the crop and grain yield were monitored. Pre-planting N fertilizer applications, soil texture and organic matter content, alfalfa stand as a previous crop and climatic conditions during the growing season affected N dynamics in the soil profile and PSNT performance. The highest potential for soil NO₃-N transport and loss through leaching was observed during the initial growth period. Testing for soil NO₃-N of the surface 30 cm before side-dressing N fertilizer application was quite representative of the available N for the plant at the beginning of the maximum N uptake period. Pre-sidedressing NO₃-N content seemed to be able to differentiate responsive from non-responsive sites, with a critical PSNT interval (0-30 cm) between 70 and 100 kg NO₃-N ha⁻¹ (15 to 22 g kg⁻¹). There is a potential for reducing N fertilizer rates without important yield reductions, allowing higher N use efficiency by the crop and lowering residual soil NO₃-N levels at harvest. Levels of available N in the soil (sidedress N fertilizer + NO₃-N in the rooting zone) beyond 300 kg N ha⁻¹ supposed no yield increments.

3.1. Introduction

In the irrigated area of the Urgell Channels corn is one of the main crops and it is responsible for almost half of the N inputs in the area. N fertilizer is applied beyond realistic crop N requirements and it is indeed related to the presence of nitrates in the groundwater. To reduce N fertilizer rates is the first step towards a rationalization of the N fertilization practices in the area. N fertilizer recommendations at a field basis based on the PSNT have demonstrated to be a good tool for reducing N fertilizer loads while maintaining yield and reducing the potential for N leaching (Durieux et al., 1995). In this chapter, the PSNT is evaluated for the conditions of the area through the monitoring of NO₃-N soil profiles, crop growth, N accumulation by the crop and grain yield, in a 2-year N rate response experiment.

Limitations to the use of the PSNT

According to Neeteson (1995) deviations may arise from using the PSNT at a field level. The algorithms derived from the experimental data to estimate N fertilizer requirements as a function of the NO₃-N levels are valid for average conditions. Field-to-field and year-to-year variations of NO₃-N profiles within the soil profile, N delivered from Net N mineralization and yield levels may result in some inaccuracy.

In addition, some authors (Fox et al., 1989 and Lory et al., 1995, referring to the PSNT) report that, N fertilizer recommendations based on the test are useful for establishing critical levels to separate responsive from non-responsive sites fields, rather than to estimate Economical Optimum N Fertilizer rates. In the latter case, economic analysis is based on adjusting yield response models to describe the relationships between crop yield,

applied N fertilizer and PSNT levels (Neeteson, 1995). According to some authors (Sexton et al., 1996; Neeteson, 1995), the use of the PSNT together with crop yield curves to identify economic optimum N rates ignore nitrate-N loss and groundwater degradation (no environmental side-effects assessment). This methodology is also subjected to potential sources of error like the type of response model and the number of N rates used in the field experiment (Cerrato and Blackmer, 1990).

Explanations for poor PSNT performance could be associated to $\text{NO}_3\text{-N}$ accumulation below the sampling depth, net N mineralization release and $\text{NO}_3\text{-N}$ redistribution within the profile just after sampling, and other crop growth restricting factors different from soil N availability (Sims et al., 1995). Short time between moment of sampling, analysis and moment of sidedress N fertilizer applications (Vitosh et al., 1988) reduces practicability. Besides, required deep sampling (> 30 cm) limits practicability. Economic considerations (cost of analysis and low price of fertilizer) are a key factor to consider when planning wide use of this soil test.

Evaluation of the PSNT

The most important methodological topics that need to be checked for the PSNT are depth and time of sampling (Magdoff, 1991a). Other important aspects, like number of samples to take, sample preparation and handling, and number of data field trials needed for establishing a regional N recommendation program, should be considered as well. Selection of time and depth of sampling is a compromise between desired best estimation of soil-N supplying capacity and fertilizer requirements, and economical plus practical management considerations. Soil sampling for nitrate-N in corn production can be carried out during previous fall or winter before planting (Pre-planting Soil Nitrate Test, PPNT) or

it can be done in early spring prior to sidedress N fertilizer decisions are made (PSNT). In general, the PPNT is only recommended in situations where leaching amounts are low over-winter (carry-over of nitrate-N is supposed to be high), and when preplant applications of manure are not practiced (Magdoff, 1991a; Zebarth and Paul, 1997). The possibility of sampling the top 30 cm instead of the whole rooting-depth is desirable from practical sampling purposes and it depends on the distribution of $\text{NO}_3\text{-N}$ in the soil profile and the existence of a correlation between $\text{NO}_3\text{-N}$ (0-30 cm) and $\text{NO}_3\text{-N}$ content in the rooting depth. Nitrate-N distribution in the soil profile is influenced by previous crop, soil characteristics, previous weather conditions and management practices (Hergert, 1987). When no significant correlation between surface and subsurface $\text{NO}_3\text{-N}$ content exists deeper soil samples (> 30 cm) may be required.

Evaluation and refinement of the PSNT for the prevailing management practices and conditions of the study area, require the conduction of N fertilizer rate trials, repeated over different soil types and years. Monitoring of soil profile nitrate-N levels through the growing season allows obtaining temporal net mineralization patterns, $\text{NO}_3\text{-N}$ content correlations within the profile, as well as, targeting periods and scenarios of potential nitrate leaching. Destructive plant samples provided plant biomass and N uptake pattern curves for the growing season, that combined with soil N- NO_3 monitoring, helped assessing temporal N availability to the crop and suggest best sampling depth and time. Knowledge of such temporal patterns may also help understanding the effect of soil type, weather conditions and management practices, as well as assessing further improvement of irrigation and fertilizer practices. Estimations of the net N mineralization contributions using a mass balance approach as described by Meisinger (1984), is a complementary analytical tool that may be used to interpret soil supply capacity and crop N requirements.

The relationship between yield, final biomass, N uptake, PSNT values and N fertilizer rate, may help assessing the possibility of using the PSNT as an index of soil N availability and N fertilizer prognosis.

The intention of the study was not to develop a N fertilizer rate algorithms based on the mineral N content at sidedressing, but to confirm the potential for the use of the PSNT for sorting fields that are responsive to N fertilizer from those that are not-responsive. Not enough number of check plots (zero N fertilizer) were monitored to draw correlations between $\text{NO}_3\text{-N}$ levels, N fertilizer rates and yield, and thus, to assess the best sampling moment (pre-planting or pre-sidedressing) and depth (0-30 cm or deeper), as well as, the capacity of the PSNT as a N availability index. That does not mean that a semi-quantitative analysis could be done to derive key aspects for the accurate use of the test.

The objectives of the study were as follows:

- (i) Characterize the temporal pattern of soil $\text{NO}_3\text{-N}$ profiles, crop growth, N uptake and N net mineralization, in order to understand the fate of N in the soil and crop response, and to target situations of highest potential for N losses through leaching.
- (ii) Evaluate the effect that variations of soil characteristics, interannual variability associated to weather conditions and agronomic practices have on soil N availability, crop response, PSNT performance and $\text{NO}_3\text{-N}$ losses through leaching.
- (iii) Analyze the potential use of the PSNT for soil N availability and N fertilizer prognosis, and evaluate the need for depth and time of sampling modifications in order to improve the PSNT estimations (overcome limitations).

3.2. Materials and methods

A total of six N fertilizer response trials with corn were conducted in farmers' fields in 1996 and 1997. The experiment was located in the irrigated area of the Urgell Channels (Ebro valley, northeast Spain). Climate in the area is considered typical continental Mediterranean, with dry and warm summers and cold winters (Villar et al., 1999). Daily weather variables during the field experiment were collected from an automated meteorological station located at Palau d'Anglesola (UTM31T CG 237133). Site locations in 1996 were not repeated in 1997. They were selected to represent two of the most typical soil groups present in the area for corn production, namely, a moderately fine surface texture and deep soils (P-1, P-2, P-4 and P-6) and a medium coarse surface texture and shallow soil (P-3 and P-5). Soils at P-1 and P-6 were classified as Fluventic Xerochrepts, Fine-loamy, mixed, mesic, P-2 and P-3 as Gypsic Xerochrepts, Fine-loamy, mixed, mesic, and P-3 and P-5 as Xerollic Calciorthids, loamy-skeletal, carbonatic, mesic (Soil Survey Staff, 1992). Table 1.1 shows the main site and soil characteristics of the experiment.

Table 1.1. Soil characteristics of the Ap horizon* and principal site characteristics

Site	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6
Year	1996	1996	1997	1997	1997	1997
Soil Series**	Penal	Castellserà	Sarsenit	Castellserà	Sarsenit	Penal
Effective Depth (cm)	90	90	60	90	60	90
Previous Crop	Corn	Alfalfa	Corn	Corn	Corn	Corn
Water Table Depth (cm)	80-100	80-100	60-80	80-100	No	80-100
pH (water susp. 1:25)	8.3	8.4	8.2	8.3	8.3	8.2
EC (25°C,E.1:5), dS m ⁻¹	0.2	0.18	0.75	0.32	0.2	0.39
Organic Matter cont., %	2.4	1.7	2.4	4.1	2.7	2.8
Equiv. Calcium Carb., %	37	39	15	45	13	35
Olsen P, ppm	23	12	13	29	53	20
K (Amonium Ac.), ppm	240	197	146	303	421	365
Mg (Amonium Ac.), ppm	425	400	> 600	467	189	384
Coarse materials (% vol)	NO	NO	10	NO	10	NO
Sand, %	13.7	11.9	38	8.7	47.2	13.2
Silt, %	52.1	57.1	34.7	48.2	31.1	53.8
Clay, %	34.2	31	27.3	43.1	21.7	33
Texture Class	Si-C-L	Si-C-L	C-L	Si-C	L	Si-C-L

* Soil analyses done at LAF

** According to Herrero et al. (1993)

All soils were well drained, with effective depths ranging from 60 to 90 cm, and with water table depths oscillating from 60 to 100 cm during the growing season except for the P-5 that had no accessible water table. Sites had similar management histories, with no manure applications in the previous year, and corn as a previous crop (except for the P-2 that had alfalfa as previous crop). In all but one site experiment (P-4) the variety *Pioneer Juanita* was used. The other variety used in the remaining site was *Pioneer Elionora*, with similar growing characteristics. No pre-planting N fertilizer was applied to the 1996 sites (P-1, P-2), while in 1997 pre-planting N fertilizer was broadcast at a rate of 100 kg ha⁻¹ (P-3, P-4, P-5, P-6). Treatments (N₀, N₁, N₂ and N₃) were four sidedress N fertilizer rates (0, 100, 200 and 300 kg ha⁻¹), with three replications except for sites P-5 and P-6 that had two replications only. These latter sites were primarily conducted for simulation modeling purposes. Urea was applied by hand within the rows and incorporated into the soil when the corn plants were 5 to 20 cm tall (V1 to V4 stage), approximately within 20 to 35 days after planting. Individual plot size was 3.5 x 14 m, arranged in a complete random design. Plant population ranged from 75.000 to 80.000 plants m⁻² with a row separation of 70 cm. Except for the application of the N fertilizer treatments, the rest of the management practices were carried out by the farmer, according to the common practices in the area. Table 1.2 summarizes the main management practices for each site.

Table 1.2. Management practices

Site	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6
Date of seeding	22-4-96	2-5-96	28-3-97	13-4-97	28-3-97	13-4-97
Plant density (pl/m ²)	75.000	76.000	79.000	80.000	79.000	80.000
Date of Harvest	12-10-96	15-10-96	23-9-97	25-9-97	23-9-97	25-9-97
Irrigation						
No. of irrigations	8	8	8	8	7	7
Origin of water	Mixed	Mixed	Mixed	Mixed	Channel	Mixed
NO ₃ Conc. (mg L ⁻¹)	30	30	45	30	10	30
Pre-Planting Fert.						
Date of application	19-4-96	19-4-96	18-3-97	1-4-97	18-3-97	1-4-97
Type of fertilizer	Blending	Blending	Blending	Blending	Blending	Blending
Side-dress. Fert.						
Date of application	24-5-96	24-5-96	2-5-97	2-5-97	9-5-97	2-5-97
	(4V)*	(2V)*	(2V)*	(1V)*	(3V)*	(1V)*
Type of fertilizer	Urea	Urea	Urea	Urea	Urea	Urea

Table 1.3 shows the calendar of irrigation events for each site. Water was applied by surface irrigation at a dose of about 100 mm per event, and was delivered by turns at a 10 to 14 days interval depending on the year and area sector. Nitrate-N content of the irrigation water at all sites ranged from 7 to 40 mg NO₃ L⁻¹ depending on its origin (direct from the river or mixed with drainage and runoff waters).

Table 1.3. Calendar of irrigation events

Site	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6
Irrigation Event						
Pre-Planting	7-4-96	9-4-96	-	2-4-97	-	-
1 st	6-6-96	9-6-96	24-5-97	30-5-97	26-5-97	31-5-97
2 nd	18-6-96	21-6-96	3-6-97	10-6-97	9-6-97	10-6-97
3 rd	30-6-96	4-7-96	14-6-97	21-6-97	18-6-97	21-6-97
4 th	13-7-96	16-7-96	23-6-97	4-7-97	2-7-97	5-7-97
5 th	25-7-96	29-7-96	4-7-97	14-7-97	12-7-97	15-7-97
6 th	6-8-96	10-8-96	15-7-97	27-7-97	25-7-97	28-7-97
7 th	19-8-96	23-8-96	25-7-97	7-8-97	7-8-97	8-8-97
8 th	-	-	2-8-97	-	-	-

Soil samples were collected during growth season, see Table 1.4, at depths of 0-30, 30-60 and 60-90 cm on each individual plot, to determine soil NO₃-N and moisture. Each sample was composited from two cores for each individual plot and depth, and they were kept cooled until analyzed. Extract from a 1:2 soil-water solution was determined colorimetrically for NO₃-N with a Technitron Autoanalyzer® within 24 hours after sampling. NO₃ concentrations (mg NO₃ L⁻¹) obtained from the analyses were converted to NO₃-N content at each depth (kg NO₃-N ha⁻¹), considering estimated values of bulk density and volume content of gross elements from available soil map information (Herrero et al., 1993) and field observations. Bulk densities ranged from 1.40 to 1.45 Mg m⁻³.

Table 1.4. Soil Sampling Calendar

Site	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6
Sample						
1 st	25-4-96	25-4-96	5-5-97	5-5-97	5-5-97	5-5-97
2 nd	30-5-96	30-5-96	22-5-97	26-5-97	26-5-97	26-5-97
3 rd	6-6-96*	6-6-96*	9-6-97	13-6-97	17-6-97	17-6-97
4 th	14-6-96*	14-6-96*	11-7-97	21-7-97	7-10-97	7-10-97
5 th	5-7-96*	8-7-96*	4-8-97	18-8-97		
6 th	25-7-96	25-7-96	7-10-97	16-10-97		
7 th	20-11-96	20-11-96				

* Only N₃ treatment was sampled

Crop development stages were followed along the growing season according to Hanway (1966). Partitioned biomass accumulation was monitored during the growing season by collecting the plants contained in a 1-row x 1.6 m sample (1.12 m²) in 1996 and a 2-row x 1.8 m sample (2.8 m²) in 1997 at each individual plot (Table 1.5). Sites P-5 and P-6 were only sampled for biomass at the beginning of the vegetative period (2-June and 19-June respectively) and at harvest. Fresh weight was determined in the field and a subsample was removed for moisture determinations in the laboratory (oven-dried at 65 °C). Biomass was expressed as dry matter by subtracting water content of the subsamples. Dried subsamples of each part of the plant (grain, stover, ear blade, stalk and leaves) were ground for total-N content determination with the Kjeldhal method, and plant N accumulation was obtained summing the result of multiplying dry weight by N concentration of each part of the plant.

At physiological maturity (black layer), corn was harvested for grain yield and partitioned biomass (stalk, leaves, stover and ear blades) determinations. A 2-row x 1.8 m sample (2.8 m²) for each experimental unit was weighted in the field and a subsample was removed from the field for moisture and total N determination as explained before. For better representativity, an additional sample of the same size was taken and the ears were removed for grain yield determination only. Grain yields are expressed at 14% moisture content.

Table 1.5. Biomass Sampling Calendar

Site	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6
Sample						
1 st	14-6-96	14-6-96	2-6-97	6-6-97	2-6-97	19-6-97
2 nd	5-7-96	15-7-96	9-7-97	28-7-97	23-9-97	25-9-97
3 rd	26-7-96	5-8-96	6-8-97	20-8-97		
4 th	29-8-96	2-9-96	23-9-97	25-9-97		
5 th	12-10-96	15-10-96				

N supplied from net N mineralization was estimated from the check plot (N_0), assuming that N loss through leaching was negligible (Magdoff, 1991a). A mass balance equation was considered, as described by Sexton et al. (1996):

$$N_{\min} = N_{\text{final}} - N_{\text{ini}} - N_{\text{ir}} + N_{\text{plant}}$$

Measured components included, N taken up by the crop (N_{plant}), and soil mineral content in the rooting zone at the beginning and at the end of the period of time considered (N_{ini} N_{final} , respectively). N_{ini} and N_{final} accounted for $\text{NO}_3\text{-N}$ content in the top 0-90 cm except for P-3 and P-4 that a 0-60 cm profile was considered (see Table 1.1). In 1997 plots (P-3 to P-6), pre-planting N fertilizer was applied before soil sampling was conducted, and therefore, N fertilizer was not considered in the mass balance equation. N delivered by irrigation water (N_{ir}) was calculated multiplying applied irrigation volumes by an average nitrate concentration measured over the growing season. In all cases, N losses through volatilization, denitrification, erosion and senescent canopy were neglected. N inputs that were not considered in the mass balance equation included, N delivered by rainfall and nonsymbiotic fixation. In order to avoid large errors in the resultant N mineralization estimations, two intervals of time were taken for mass balance calculations. The first interval was defined between pre-planting and pre-sidedressing (from end of April to end of May) and the second between blister stage and harvest (end of July to harvest). During both periods, irrigation was absent or minimum (see Tables 1.3) and N uptake was not important, making N mineralization the key N balance component.

Recovery of fertilizer-N by the crop (NREC) at each sidedress fertilizer level was calculated as described by Greenwood and Draycott (1988):

$$NREC = \frac{N_{\text{plant}} - N_0}{N_{\text{fert}}}$$

where, N_{plant} is the total N uptake by the plant, N_0 is the N uptake by the plant in the check plot (zero N fertilizer) and N_{fert} is the N applied as fertilizer. Finally, internal Nitrogen Use Efficiency or Fertilizer Use Efficiency (NUE_i , kg of grain per kg of applied fertilizer) and external Nitrogen Use Efficiency (NUE_e , kg of grain per kg of N uptake) were estimated for each treatment.

For statistical analysis purposes Site was taken as the main factor, considering only the sites where three replications per N treatment were implemented (P-1, P-2, P-3 and P-4). When interpreting the results, the influence of the Site has to be thought as the combined effect of crop season, soil type and management practices at each experimental site. The secondary factor in the analysis was the N Fertilizer Dose applied at sidedressing. A combined ANOVA, using the SIGMASTAT program, was performed to assess the significance of the effect of N Fertilizer Dose and its interaction with the Site. Furthermore, individual Analyses of Variance were done at each site to investigate existing significant differences among N treatments at harvest time, concerning grain yield, total biomass and plant N content among other variables of interest. Mean separation was performed by the Student-Newman-Keuls Test. Although the N levels are indeed quantitative, for the purpose of mean separation tests they were considered as discrete levels, representing zero N fertilizer (N_0), low N fertilizer (N_1), medium N fertilizer (N_2) and high N fertilizer (N_3). Additionally, the Cate-Nelson method (Cate and Nelson, 1971) was used to separate N fertilizer responsive sites from the non-responsive ones. Linear and quadratic models were used to describe yield response data in relation to available N and N fertilizer, using the minimum sum of squares procedure.

3.3. Results and discussion

Meteorological Conditions and crop development stages during the experiment

Preceding winters were unusually wet for both years (Figure 1.1), with winter (November to January) accumulated precipitation amounts of 240 mm in 1996 and 230 mm in 1997. February and March scarcely received any precipitation, while in 1997, summer precipitation registered values above the average. Growing season during 1996 was slightly dryer than normal, except for the latest part of the growing season. Overall air temperatures were slightly higher in 1997 than in 1996. In 1996, temperatures during June and July were warmer than usual, but were colder in September and October during crop maturity. The second year of experimentation was characterized by a warm spring (from February to May) and a colder summer. Priestley-Taylor accumulated Potential Evapotranspiration (ET_p) during the growing season was about 850 mm in 1996 and 750 mm in 1997.

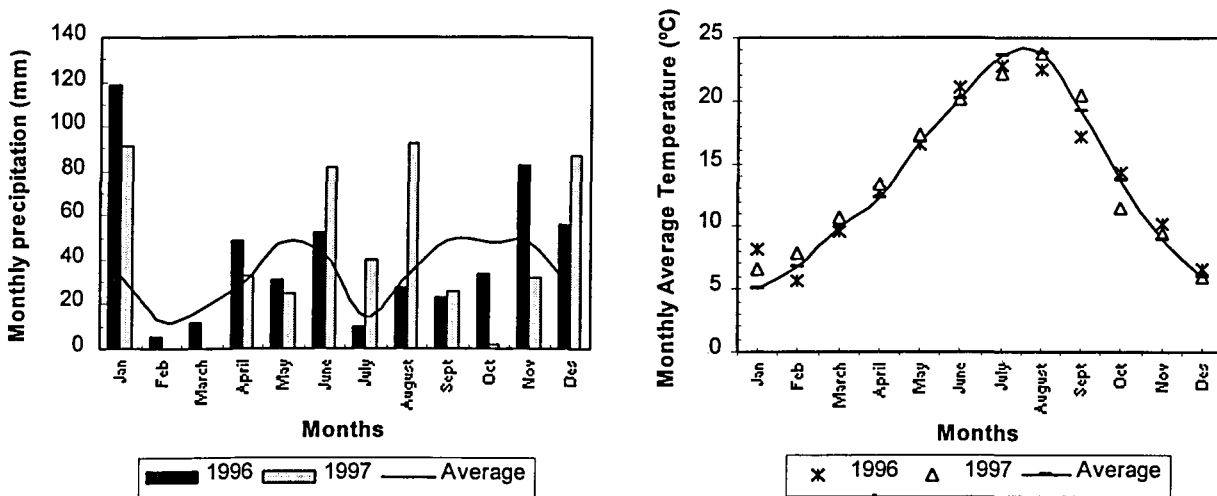


Figure 1.1. Measured monthly-accumulated precipitation and monthly average daily mean temperature for 1996 and 1997.

Crop development stages observed during the growing season are shown in Table 1.6. Note that due to earlier sowing, pollination in sites P-3 and P-5 occurred substantially earlier than the remaining sites in 1997.

Table 1.6. Dates of development stage occurrence.

Stage	P-1	P-2	P-3 and P-5	P-4 and P-6
Planting	22-4-96 (112)	2-5-96 (122)	28-3-97 (87)	13-4-97 (103)
Emergence	2-5-96 (122)	14-5-96 (134)	9-4-97 (99)	27-4-97 (117)
5-leaves fully emerged	2-6-96 (153)	10-6-96 (161)	19-5-97 (139)	2-6-97 (153)
8-leaves fully emerged	20-6-96 (171)	25-6-96 (176)	9-6-97 (160)	13-6-97 (164)
10-leaves fully emerged	25-6-96 (176)	2-7-96 (183)	15-6-97 (166)	21-6-97 (172)
Tassel fully emerged	8-7-96 (189)	18-7-96 (199)	22-6-97 (173)	6-7-97 (187)
Silks emerging	19-7-96 (200)	25-7-96 (206)	2-7-97 (179)	18-7-97 (199)
Blister stage	28-7-96* (209)	1-8-96* (213)	12-7-97 (189)	24-7-97* (205)
Milk stage	4-8-96 (216)	8-8-96 (220)	20-7-97 (195)	1-8-97* (213)
Soft-dough stage	10-8-96* (222)	14-8-96* (226)	26-7-97 (203)	6-8-97 (220)
Physiological maturity	1-10-96 (274)	1-10-96 (274)	25-9-97 (268)	25-9-97 (268)

* In parenthesis is the day of the year.

Soil NO₃-N temporal pattern

Soil NO₃-N content of the entire root zone at pre-planting ranged from 90 to 332 kg N ha⁻¹ (Table 1.7). Maximum levels corresponded to 1997 sites that received pre-planting fertilizer N application (100 kg N ha⁻¹). This was reflected, as well, by elevated NO₃-N contents in the top 30 cm of soil. In addition, accumulation of NO₃-N in the surface horizon partially reflected N mineralized during early spring and previous fall. In 1997, maximum nitrate-N levels in the topsoil layer corresponded to sites with lighter surface textures. A possible explanation for this observation was that lighter textures provided a better aeration during early spring, period when soils were still very moist due to excessive winter rainfall. This aeration probably enhanced nitrification while minimizing losses from N denitrification, in comparison with heavier textured sites. This agrees with observations by Dou et al. (1995) that found a delay of soil NO₃⁻ peaks after applying NH₄NO₃ as fertilizer, as a result of a lag in nitrification that depended on texture. No other clear

differences among sites were observed due to variations of soil texture and pre-planting irrigation events.

Table 1.7. Soil NO₃-N content (kg NO₃-N ha⁻¹) in the profile taken at Pre-planting and Pre-Sidedressing.

Depth (cm)	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6
<i>Pre-Planting</i>						
0-30	39	64	138	94	287	56
30-60	26	27	20	35	45	33
60-90	24	11	-	13	-	14
Root Zone	89	91	158	142	332	103
<i>Pre-SideDressing</i>						
0-30	69a	135ab	146ab	104ab	206b	53a
30-60	28a	46a	24a	69a	70a	48a
60-90	28a	21a	-	19a	-	23a
Root Zone	125a	181a	170a	192a	276a	124a

* Among columns, means followed by the same letter are not significantly different at the 0.05 significance level. ** No statistical analysis was conducted with the pre-planting data due to lack of true repetitions.

Profiles shown in Table 1.7 should be taken with precaution when extrapolating to other over-winter conditions, depending on winter rainfall and previous residual N-NO₃ profiles. NO₃-N soil profiles at Pre-Sidedressing reflected how the increase of soil temperature in spring resulted in higher N mineralization rates and NO₃-N accumulation in the 0-30 cm layer. The highest absolute increase was observed at P-2, where alfalfa stand was incorporated in late winter. In all sites, some NO₃-N accumulation was observed in the 30-60 cm horizon, probably as a result of rainfall occurring between the two sampling dates, considering that soil profile was relatively wet at planting time. NO₃-N contents in the 0-30 cm layer oscillated from 53 to 206 kg NO₃-N ha⁻¹, with higher levels in 1997 due to pre-planting fertilizer N application.

Figure 1.2 shows the evolution of soil profile NO₃-N content for the most fertilized treatment (N-3, 300 UN) and four sites. A sheet of gravels at 60 cm limited soil depth at site P-3, and therefore the graphs only display NO₃-N content at 0-30 and 30-60 cm.

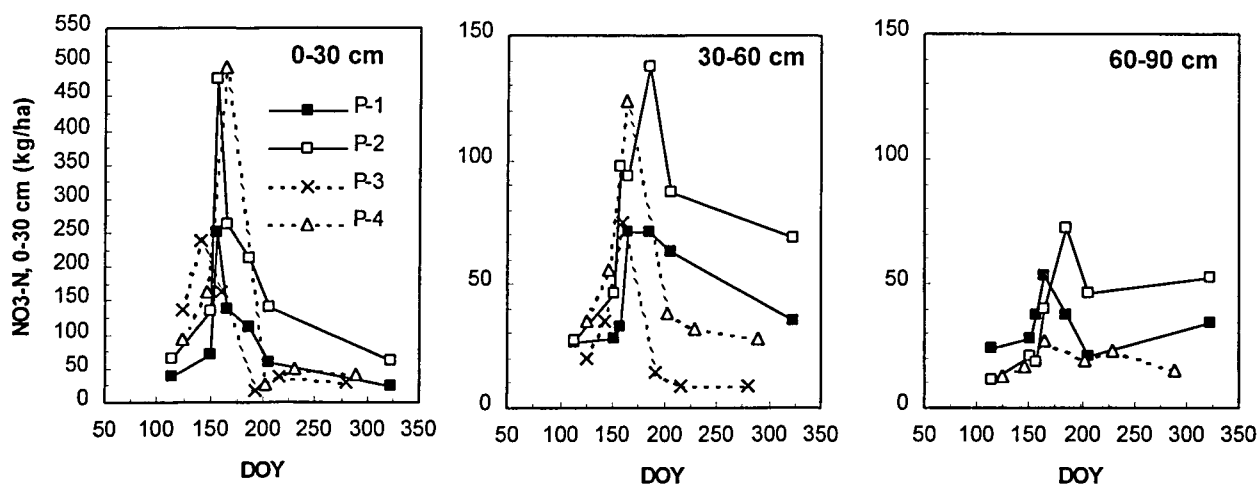


Figure 1.2. Temporal evolution of soil $\text{NO}_3\text{-N}$ distribution within the profile for the highest N sidedress fertilizer treatment, N-3 (300 UN).

As it can be observed, seasonal patterns were similar among sites. In general, three phases could be recognized:

- (I) Initial phase corresponded to the period between corn planting to shortly after sidedressing fertilizer application (mid-April to mid-June, 105 to 166 DOY). This period was characterized by the initiation of maximum N crop demand. At the end of this period, there was a dramatic increase of the $\text{NO}_3\text{-N}$ present in the 0-30 cm layer as a consequence of sidedress N fertilizer application. This increase was especially dramatic in sites P-2 and P-4. The reason behind, could be the presence of an alfalfa stand and high organic matter content at each site, respectively, although sampling time could influence the size of the detected fertilizer pulse.
- (II) This period could be associated with the crop active growth and N uptake period (mid-June to End-of-July, 166 to 212 DOY, see Figure 1.5). This active uptake by the crop was reflected by a steady diminution of $\text{NO}_3\text{-N}$ content in the surface and subsurface horizons (latter on). This decrease of $\text{NO}_3\text{-N}$ in the soil surface was also the result of

NO₃-N movement to deeper horizons (30-60 and 60-90 cm) due to the initiation of irrigation events. This sub-surface enrichment, in comparison with surface NO₃-N depletion, was proportionally more important in site P-3 than in the others, possibly due to the coarser texture of the soil. By the end-of-July, site P-3, resulted in lower NO₃-N levels, probably as a consequence of a more accentuated nitrate transport below 60 cm.

(III) This period (end-of-July to harvest, 212 to 273 and 324 DOY) is characterized by a reduction of the N uptake rate, and fewer irrigation events. In 1996, (P-1 and P-2), post-harvest sampling was conducted as late as late-November. Due to abundant precipitation during that fall, some NO₃-N could be moved deeper (60-90 cm), accompanied by a decrease in the 0-30 and 30-60 cm NO₃-N levels.

Comparison of soil NO₃-N profiles within experiments can help assessing the effect of N fertilizer applied at sidedressing. Only data from site P-4 is shown here (Figure 1.3)

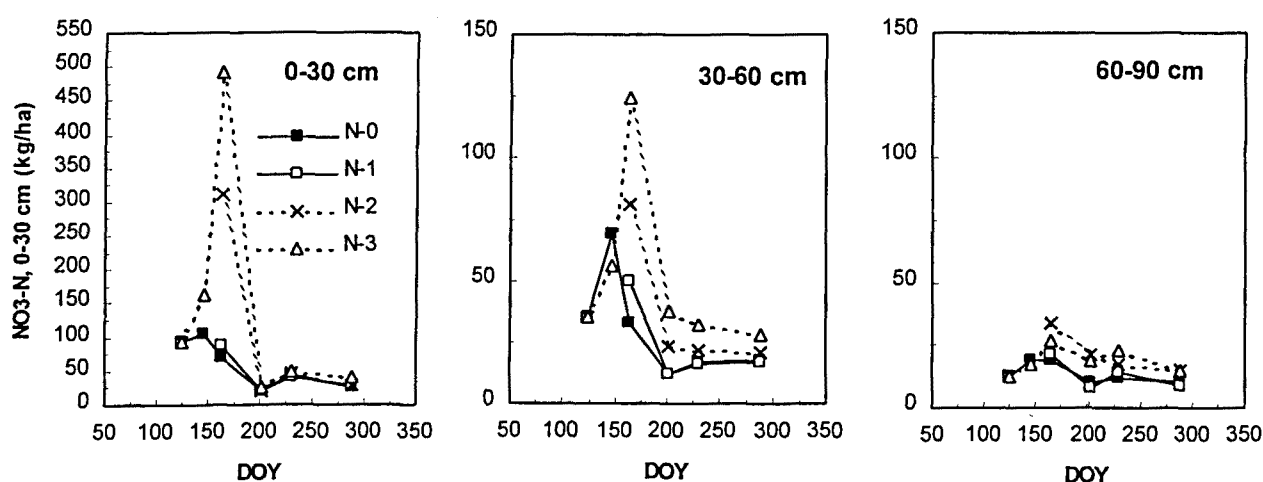


Figure 1.3. Temporal evolution of soil NO₃-N distribution within the profile in experiment P-4.

Treatments with highest rates (N-2 and N-3) showed similar temporal pattern, although peak NO₃-N levels in the soil surface and subsurface layers reflected less accumulation for

the N-2 (200 UN) than for the N-3 (300 UN) treatment. The N-1 treatment had similar levels than the check plot (N-0). Notice that during the initial slow growing phase, some N transport to the subsurface horizon (30-60 cm) occurred, but it looks that it was absorbed later by the plant. Finally, the N-2 and N-3 treatments reflected NO₃-N enrichment of subsurface horizons that was not used by the crop. It could be postulated, then, that excess of N fertilizer applied to fine textured soils could not be detected in the soil surface but as a pulse in deeper profiles. In shallower and coarser textured soils, this accumulation would be potentially leachable during the growing season.

Rooting zone residual NO₃-N content at the end of the growing season fluctuated between 33 and 181 kg ha⁻¹ (Table 1.9), with a total average value of 70 kg ha⁻¹. Values corresponding to experiment P-2 were significantly higher than the rest, while minimum values were detected in site P-3. In site P-2, higher levels would be a consequence of N mineralization from previous alfalfa stand, while in P-3, lower levels could be a result of a more accentuated nitrate transport below the rooting zone due to shallower soil (0-60 cm) and coarser texture. Figure 1.4 shows graphically the combined relationship between soil available N (N fertilizer rate + soil mineral content at pre-sidedressing), residual NO₃-N and yield. An inflection point between 250 and 300 kg NO₃-N ha⁻¹, could be interpreted as an indication that beyond this level, an increase of available N was not used to increase yield rather than to increment N content in the grain and be accumulated in the soil profile. This observation would open the possibility of lowering fertilizer applications to values of available N around 300 kg NO₃-N ha⁻¹, and thus reduce residual NO₃-N levels while maintaining acceptable yields.

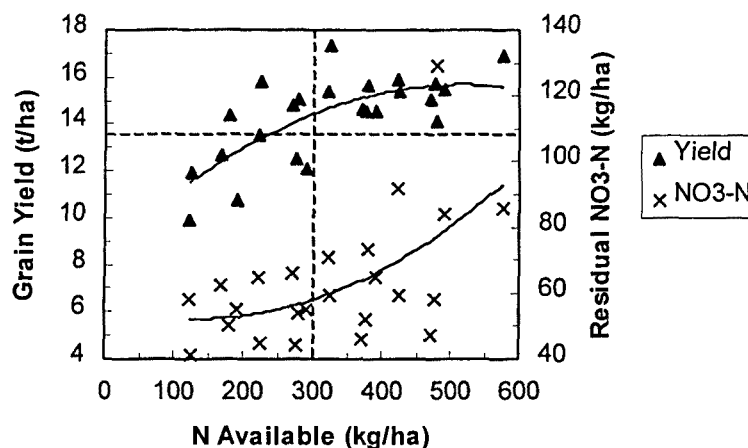


Figure 1.4. Observed relationships among yield, residual $\text{NO}_3\text{-N}$ and available N at pre-sidedressing (sidedress N fertilizer + N_{ini} , rooting zone).

Nitrogen balance

Table 1.8 shows N mineralization data for the time intervals considered in the mass balance calculations. Irregular data in experiment P-5, with negative N mineralization values during early spring, were not showed in Table 1.8. In a different way, P-2 and P-4 sites presented higher N mineralization rates during the first period. At P-2, this rate was not much different to the rate reported by Magdoff (1991a) when alfalfa was the previous crop. At site P-4, the obtained higher rate could be the result of an elevated soil organic matter content. Actually, the farmers of the area consider the soils at P-4 site as highly productive. For the three remaining sites (P-1, P-3 and P-6), N mineralization rates for the early season period ranged from 1.6 to 2.0 $\text{kg N ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$. These values fall within the range found by Dou et al. (1995). For the period between “milk stage” and harvest, N mineralization rates were more uniform among sites and oscillate between 0.4 and 0.7 $\text{kg N ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$, in concordance with values reported by Magdoff (1991a). Slower mineralization rates during late season could be understood considering that conditions for mineralization were more detrimental (drier soil and lower temperatures). Magdoff

(1991a) found that after the easily decomposable fraction of a green manure stand is mineralized, the rate of N mineralization drops drastically. Therefore, the calculated values for the latter part of the season would be somehow applicable to sites with alfalfa as a previous crop. For both periods, and looking at sites with equal soil organic matter content (P-1 and P-3), N mineralization rate decreased with higher clay content. This latest observation agreed, as well, with literature reviewed by Magdoff (1991a).

Table 1.8. Estimated N mineralization amounts (kg N ha^{-1}) from the mass balance equation in the N_0 treatment plots.

Site	Pre-planting to Pre-Sidedressing			"Milk Stage" to Harvest		
	N mineralization (kg N ha^{-1})	Interval duration (days)	N miner. rate ($\text{kg N ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$)	N mineralization (kg N ha^{-1})	Interval duration (days)	N miner. rate ($\text{kg N ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$)
P-1	56	35	1.6	47	118	0.4
P-2	100	35	2.9	-	-	-
P-3	32	17	1.9	45	63	0.7
P-4	65	21	3.1	39	84	0.5
P-6	41	21	2.0	-	-	-

Preliminary estimations of total amounts of N resulting from mineralization were assessed based on the previously estimated N mineralization rates. Assuming an average N mineralization rate of $1.8 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$ during the early season (mid-April to End-of-May, 45 days), it brings to an average supply of 81 kg N ha^{-1} . For the same period and considering that an alfalfa stand was present, a N mineralization rate of $2.9 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$ yields 130 kg N ha^{-1} . In the latter part of the season (end-of-July to beginning-of-October), a 62d interval and an average N mineralization rate of $0.5 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$ supplied the soil with 31 kg N ha^{-1} .

Even though the calculated values were not different to field-measurements done by other authors (Wehrmann et al., 1988; Power and Broadbent, 1989 and Jokela and Randall, 1989), numbers have to be taken with extreme caution due to expected variations resulting

from soil texture and organic matter content variations, previous manure applications, and the combined effect of temperature and rainfall year-to-year variability. Additional attention should be considered to the uncertainties associated to the estimation of non-measured N balance components, such as N delivered by irrigation and N loss through volatilization and denitrification.

Plant Nitrogen Uptake (Temporal pattern)

Only a description of the general N uptake pattern was intended in this section. For a detailed analysis of N accumulation by the crop, more intensive sampling would be necessary. In general, N uptake accumulation followed the same trend for the four sites examined (data only shown for P-2 and P-4 sites). Figure 1.5 showed slow initial N uptake due to small N demand by the crop during this period, with uptake rates ranging from 0.44 to 0.86 kg N ha⁻¹ day⁻¹, depending on the site and N fertilizer treatment. Following 6-leaf stage and initiation of stem elongation (coinciding approximately with first biomass sampling), N uptake became more intense, reaching peak N uptake rates to about 2.5 to 4.1 kg N ha⁻¹ day⁻¹ for the highest N fertilizer treatments. These rates were in concordance with values indicated by Magdoff (1991a), Jokela and Randall (1989) and Karlen et al. (1988), that reported maximum uptake rates 2-to-3 weeks prior to silking. During this period and for the same treatments, as well, from 64 to 81% of total N uptake was accumulated. According to the graphs displayed in Figure 1.5, this period of maximum N uptake continued until end of July (doy = 210), coinciding with blister stage in the majority of sites. During grain filling period, N uptake rates were much lower than during active vegetative growth and pollination.

During 1997 (site P-4) N uptake during grain filling period was somehow lower than in 1996 plots (site P-2). Combined with lower accumulated ET and crop N demand during the 1997 season, it is likely that this N uptake was affected by the lower $\text{NO}_3\text{-N}$ levels found at the beginning of this period in 1997, in particular for the subsurface horizons (see Figure 1.2). This would result in a shortage of available N in the soil. These low levels in 1997 could be justified by unusual high rainfall in July and a major number of irrigation events before grain filling (see Table 1.3 and Figure 1.1), that together, would aggravate N loss through leaching and denitrification. Sidedressing N fertilizer levels, apparently affected crop N availability in the soil and N uptake by the plant. Except for experiment P-2, that had alfalfa as previous crop, clear differences were observed for the N-0 treatment (no sidedress N fertilizer). In this case, N uptake accumulation seemed restricted shortly after active growth period was initiated. This was reaffirmed by lower $\text{NO}_3\text{-N}$ levels in the soil during the growing season for the N-0 treatment (see experiment P-4 in Figure 1.3).

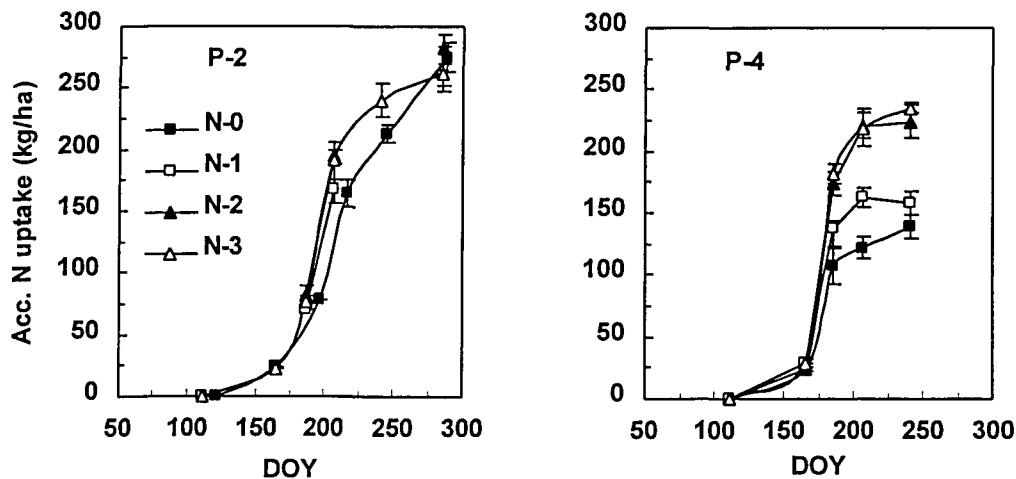


Figure 1.5. Aboveground N uptake accumulation by corn for P-2 (1996) and P-4 (1997) sites.

Yield, biomass and N uptake

Final crop performance variables are displayed in Table 1.9. Overall grain yield average was 14.3 t ha⁻¹, with a minimum observed value of 9.9 and a maximum of 17.3 t ha⁻¹. Accumulated biomass at harvest was 23.6 t ha⁻¹ in average, fluctuating between 17.4 and 28.4 t ha⁻¹.

Table 1.9. N content, N uptake, Grain Yield, Biomass, Harvest Index and soil residual NO₃-N levels (rooting zone) for the N rate treatments.

Site	N cont. in the plant (%)	N cont. in the grain (%)	Plant N Uptake (kg ha ⁻¹)	Grain N Uptake (kg ha ⁻¹)	Biomass (t ha ⁻¹)	Grain Yield (t ha ⁻¹)	Harvest Index	Residual NO ₃ -N (kgha ⁻¹)
P-1								
N-0	0.84a	1.13a	191a	117a	22.8a	12.0a	0.46a	50a
N-1	1.06b	1.39b	267b	190b	25.3a	15.8b	0.54b	56a
N-2	0.93b	1.25ab	261b	188b	28.2a	17.3b	0.53b	79b
N-3	0.97b	1.31ab	256b	175b	26.2a	15.4b	0.51b	92b
P-2								
N-0	0.97a	1.34a	275a	166a	28.4a	14.3a	0.44a	62a
N-1	0.98a	1.35a	260a	177a	26.6a	15.0a	0.49a	76a
N-2	1.03b	1.43a	282a	196a	24.0a	15.7a	0.57a	94a
N-3	1.01ab	1.38a	261a	169a	25.7a	14.1a	0.48a	181a
P-3								
N-0	0.73a	1.11a	175a	123a	24.0a	12.7a	0.46a	51a
N-1	0.97b	1.31a	217a	168a	22.3a	14.8a	0.58b	55a
N-2	0.85b	1.19a	200a	152a	23.2a	14.6a	0.55b	33a
N-3	0.93b	1.30a	219a	170a	23.5a	15.0a	0.56b	39a
P-4								
N-0	0.71a	1.07a	139a	101a	19.4a	10.7a	0.48a	55a
N-1	0.77a	1.13a	158a	119a	20.4a	12.1a	0.52ab	55a
N-2	0.96b	1.40b	224b	177b	23.1b	14.5b	0.55b	65a
N-3	0.97b	1.39b	235b	187b	24.1b	15.5b	0.56b	84a
P-5*								
N-0	0.75	1.02	148	111	19.8	12.5	0.55	34
N-1	0.83	1.16	183	146	22.1	14.5	0.57	52
N-2	0.87	1.24	222	169	25.6	15.7	0.53	58
N-3	0.90	1.18	224	173	25.0	16.9	0.59	86
P-6*								
N-0	0.67	0.98	117	84	17.4	9.9	0.49	57
N-1	0.86	1.11	173	130	20.0	13.5	0.59	43
N-2	0.92	1.22	211	162	23.0	15.4	0.58	54
N-3	0.96	1.27	234	176	24.4	15.9	0.56	66

* These experiments consisted only in two replications. Therefore, no statistical analysis was performed.

** Within columns, means followed by the same letter are not significantly different at the 0.05 significance level. *** Soil Residual NO₃-N content refers to the entire rooting depth

Poorer crop performance was observed for the check plots (except for site P-2) due to N shortage in the soil. Higher values in 1996 (P-1 and P-2) probably responded to the greater ETp accumulated values during that year, and lowest biomass and yield results in P-4 and

P-6 were a consequence of a later seeding date in 1997. A potential yield level was established considering the plots located above the horizontal line defined by the Cate-Nelson analysis in Figure 1.4. In this way, a potential yield between 15 and 16 t ha⁻¹ and a potential biomass oscillating between 24 and 25 t ha⁻¹ were taken, assuming no water and N restrictions, and with possible variations depending on field and season.

Plant N content and N uptake can be considered an index of soil N availability, which in turn, is the resulting combination of N loss processes and N delivered by N mineralization, irrigation water and mineral N present at the beginning of the growing season. Nitrogen content in plant and grain and N uptake showed general lower levels for the check plots (N-0), except for site P-2. This shortage of N in the check plots was not evident in site P-2 due to the contribution of alfalfa stand to soil mineral N buildup.

The graph plotted in Figure 1.6a shows the relationship between N content in the grain and yield. Using the Cate-Nelson graphical procedure, a critical level of N content in the grain between 1.1 and 1.2 kg N kg⁻¹ could be suggested, above which grain yield would not show a significant increase. Plots in the right side of the Cate-Nelson vertical line were located in the plateau section of the scattered graph, meaning that for N contents in the grain above 1.1 to 1.2 kg N kg⁻¹ there was a luxury consumption that did not corresponded to a grain yield increase. Figure 1.6b indicates that to reach N concentrations in the grain above the critical level, and ensure non-N-limited potential yield (above 14 t ha⁻¹), the crop needs to accumulate a minimum of 200 kg N ha⁻¹.

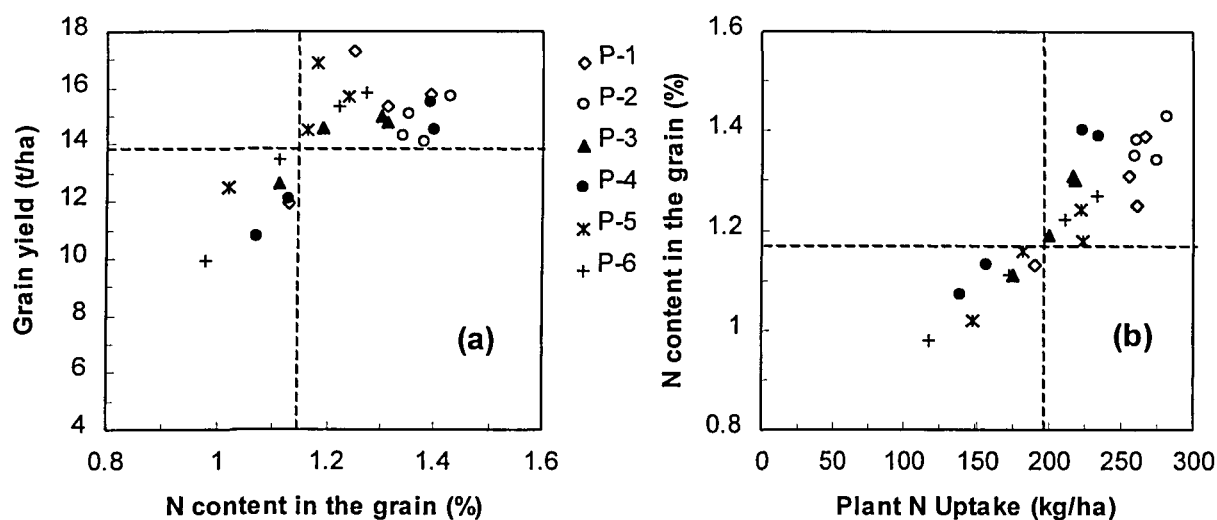


Figure 1.6. Observed relationship between N content in the grain and yield (a), and between Plant N Uptake and N content in the grain (b), for all the plots.

A potential plant N uptake level could be established for further applications in fertilizer recommendation calculations and simulation modeling comparisons. For this purpose, individual plots above the horizontal line in Figure 1.6b were averaged, yielding a value around 240 kg N ha⁻¹.

Plant N uptake depends on N crop demand (crop growth) and N available in the soil. For the conditions of the study plant N uptake was significantly affected by N rate and site. The relationship between plant N uptake and an index of soil N availability (sidedress N fertilizer + NO₃-N in the rooting zone) was plotted (Figure 1.7), and using the Cate-Nelson procedure a critical level was tried to be inferred. For a plant N uptake amount around 200 kg N ha⁻¹, the quantity of N available for the crop that would be required would depend upon the year as indicated by the two vertical lines drawn in Figure 1.7

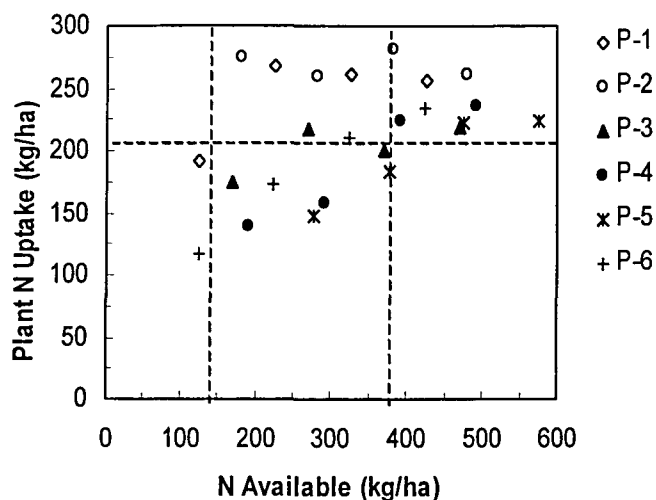


Figure 1.7. Observed relationship between Plant N Uptake and available N at pre-sid dressing (sidedress N fertilizer + soil $\text{NO}_3\text{-N}$ in the rooting zone).

For the 1996 plots (P-1 and P-2), no plant N uptake increase seemed to happen above 140 kg N ha^{-1} , while for the 1997 plots (P-3 to P-6) the borderline level would be around 370 kg N ha^{-1} . As discussed earlier, lesser N losses and alfalfa stand in P-1 and P-2, respectively, contributed to soil N build up in a more important way than in 1996, and allowed the plant to perform well even with low soil available N. The value of 300 kg N ha^{-1} of soil available N at sidedressing, deduced in Figure 1, fell within the critical interval (140 to 370 kg N ha^{-1}) that indicates no further yield increase to available N.

There was a clear decrease of NREC as N rate increased, with an average value of 0.57, 0.35 and 0.24 for N-1, N-2, and N-3 treatments. These data ratifies that lowering N fertilizer rates to a certain limit, enhances apparent substitution of N fertilizer by N supplied by the soil, without detrimental consequences for crop growth and N uptake. In the other hand, by lowering N fertilizer rate and increaasing NREC, less residual N was present in the end of the growing season (see Figure 1.4). Average NUE_i was 69:1, with 52:1 and 85:1 as the minimum and maximum values respectively. This index was quite

constant among N rate treatments and sites, but showed consistent lower values for the 1996 treatments (P-1 and P-2), and for higher N-rate treatments in general. This observed pattern could be associated to some luxury consumption as discussed earlier. External Nitrogen Use Efficiency (NUE_e) was very similar among experimental sites, but showed a sharp influence of N fertilizer rate. Average value was 91:1, ranging from 47:1 to 158:1, with average rates of 143:1, 78:1 and 52:1 for N-1, N-2 and N-3 treatments. Considering that NUE_i was quite constant among treatments, decrease of NUE_e with increasing N rate could be associated to lose of efficiency of the applied fertilizer before was taken up by the crop.

Evaluation of the Pre-sidedress Soil Nitrate Test (PSNT)

Ideally, sampling for the PSNT needs to be done a few days before sidedress N fertilizer application, coinciding with beginning of active crop growth and N uptake. As seen in Figure 1.2 and 1.7, this moment took place around the first two weeks of June (3-6 leaves fully emerged). By sampling at this time rather than at pre-planting, measured mineral N contents were able to detect N supplied by net N mineralization, and also to reflect NO_3 -N transport within the soil profile due to water and solute transport from early irrigation events and rainfall. This latter aspect would be especially important in wetter winters and springs, when the soil may be quite moist by the time of first irrigation. Changes in soil NO_3 -N content and distribution before sampling for PSNT would be more accentuated in fields where alfalfa was the previous crop or with high organic matter content, as discussed earlier.

Necessity for deep sampling in the PSNT is a critical aspect for wide use of the test in commercial fields and N rate prognosis. In any case, prediction of 30-60 and 60-90 cm $\text{NO}_3\text{-N}$ contents from 0-30 cm sampling were not reliable estimations (linear regression correlations not shown), even though they reflected an accumulation of N in the soil surface. Lack of correlation between $\text{NO}_3\text{-N}$ content in the surface and subsurface layers was also observed by Ehrhardt and Bundy (1991) and Brown et al. (1991). Some attention should be given to potential $\text{NO}_3\text{-N}$ redistribution occurring right after pre-sidedressing sampling as a consequence of irrigation (see Figure 1.2). If a shallow and coarse soil is present, measured PSNT levels (0-30 cm) may not be indicative of the available N for the crop. In finer and deeper soils, the pulse of N transported below 30 cm may be used by the crop in later stages or leached by subsequent irrigation events. Evaluating the effect on the correlation models of previous crop, soil characteristics, manure history and winter rainfall is also a necessary step towards selecting an appropriate sampling depth. A poor prediction capacity of the test would indicate that pre-sidedress $\text{NO}_3\text{-N}$ amounts and distribution within the soil profile has not a regular pattern in relation to the mentioned variability factors, and that the potential for inaccurate recommendations will increase for the 0-30 cm sampling. Although the poor correlations obtained do not indicate that taking shallower samples for the PSNT is appropriate, the fact that $\text{NO}_3\text{-N}$ content represents an important contribution to the total $\text{NO}_3\text{-N}$ content in the entire profile suggests that shallower sampling (0-30 cm) could be a reasonably accurate estimation of soil available N for corn. Based on data from Table 1.7, $\text{NO}_3\text{-N}$ content in the upper layer represents 43 to 75% of $\text{NO}_3\text{-N}$ (0-90 cm), and 52 to 86% $\text{NO}_3\text{-N}$ (0-60 cm).

From the ANOVA test conducted and summarized in Table 1.9, only sites P-1 and P-4 shown a significant difference of yield when some fertilizer was applied at sidedressing.

Looking at Table 1.7, these sites had NO₃-N levels (0-30 cm) at sidedressing lower than the rest. Preliminary critical levels for separating responsive sites could be set between 69 and 104 kg NO₃-N ha⁻¹ (16 to 25 mg NO₃-N kg⁻¹). These values fell within the range found by other researchers (Fox et al., 1992; Klausner et al., 1993; Zebarth and Paul, 1997). At site P-2, all indicates that, after alfalfa corn does not need N fertilizer applications, and that the PSNT levels partially reflect N delivered from residue decomposition. This agrees with observations by Dou et al. (1995). More response trials would be necessary to narrow this preliminary interval and gain accuracy in separating responsive from non-responsive sites, as affected by soil characteristics and seasonal conditions. Finally, other factors, such as presence of shallow water table, irrigation water loaded with nitrates, restricted water supply, hail and pest effects on crop growth, manure application, fertilizer type and time of application should be considered as well.

3.4. Conclusions

Conclusions should be considered provisional, requesting more extensive field experiments to represent a wider set of conditions and to have more statistical strength in the analyses.

1. Some factors appeared to have greater effect on soil N availability, crop response, PSNT performance and N losses through leaching:
 - 1.1. Pre-planting N fertilizer applications were clearly reflected by the PSNT.
 - 1.2. Excess of N fertilizer accumulated in the soil at the end of the growing season and was likely to be redistributed to deeper layers during fall and winter, increasing the potential for N loss through leaching.
 - 1.3. Soil texture seemed to play a role modifying aeration in early wet springs, reducing denitrification and enhancing nitrification in coarser soils. Coarser

textures also favored N transport and potential N loss through irrigation and rainfall during the growing season.

1.4. Net N mineralization from alfalfa stand greatly affected PSNT and the residual N at harvest. No crop response to N was found after alfalfa.

1.5. Higher soil organic matter contents reported higher N mineralization, that was detected by the PSNT.

1.6. Year climatic conditions played an important role on determining potential crop growth and N demand. Unusual high rainfall during winter and during the growing season was responsible for N transport within the profile, even in fine textured soils.

2. Some general trends could be extracted from the observation of the temporal evolution of the $\text{NO}_3\text{-N}$ profiles, N mineralization and accumulation of N and biomass by the crop:

2.1. The active N uptake period occurred from mid-June to end-of-July (shoot elongation to blister stage). Nitrogen was absorbed mainly from the surface layer but later on this period N uptake from subsurface layers was also detected.

2.1. Net N mineralization was especially relevant during vegetative growth when soil moisture is high due to higher irrigation frequency.

2.2. There was a shortage of N in the check plots during the vegetative growth period. A shortage of N could occur in some N fertilized plots during grain filling if soil $\text{NO}_3\text{-N}$ levels are relatively low at the beginning of this period.

2.3. There is a potential for N loss through leaching during the non-growing period if rainfall is important. During early vegetative growth some $\text{NO}_3\text{-N}$ transport below

the root zone could occur due to the slow N uptake rate and the beginning of the irrigation scheduling. High storms latter in the season can also result in N leaching.

3. In relation to the potential for N rate reductions and the potential for the use of the PSNT, the following conclusions were extracted from the study:

3.1. Testing for $\text{NO}_3\text{-N}$ before sidedressing N fertilizer application was quite representative of the available N for the plant at the beginning of the maximum N uptake period.

3.2. A minimum N uptake level of $200\text{--}240 \text{ kg N ha}^{-1}$ was needed to reach a critical level of $1.1\text{--}1.2 \%$ N in the grain, above which N yield showed no response to N fertilizer.

3.3. Soil available N contents at sidedressing (Sidress N fertilizer + $\text{NO}_3\text{-N}$ root depth) between 300 and 400 kg N ha^{-1} seemed to be the critical interval that indicates no further yield increase to available N.

3.4. Although more data points may be needed, sampling for $\text{NO}_3\text{-N}$ in the first 30 cm of the soil seemed to be a good estimation of the $\text{NO}_3\text{-N}$ in the whole profile. Some care should be taken in coarser and shallower soils due to potential N redistribution within the profile and N loss through leaching just after sampling resulting from the first irrigation events.

3.5. The PSNT can be used to identify fields that do not require N fertilizer for attaining maximum yield. Therefore, the test can be useful to avoid over-application of N. A preliminary soil $\text{NO}_3\text{-N}$ level ($0\text{--}30 \text{ cm}$) between 70 to 100 kg ha^{-1} (15 to 22 g kg^{-1}) was established, beyond which no crop response to N fertilizer is expected.

**4. CAPÍTULO II. Evaluación del modelo de simulación
CropSyst para maíz en condiciones de regadío del Valle del
Ebro.**

4. EVALUACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN CropSyst PARA MAÍZ EN CONDICIONES DE REGADÍO DEL VALLE DEL EBRO

Resumen

Previamente a la aplicación del modelo para la evaluación de las prácticas de manejo de la fertilización N en la zona, se procedió a una validación exhaustiva de las capacidades predictivas de 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 los experimentos de campo descritos en el Capítulo I, referentes al crecimiento del cultivo y la dinámica del agua y el nitrógeno en el sistema suelo-planta-atmósfera. 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 hace un trabajo razonable en la simulación de la demanda de N por el cultivo y de 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. 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, 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.

4.1. 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. 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. En el Capítulo I se detallan ampliamente los experimentos realizados en la zona con diferentes dosis de N aplicado, con la finalidad de estudiar las posibilidades del PSNT como herramienta de diagnóstico del N disponible en el suelo y de las necesidades de fertilizante N del cultivo.

Los modelos de simulación permiten complementar la información experimental, así como evaluar y desarrollar prácticas de fertilización nitrogenada adecuadas. Antes de aplicar un modelo de simulación es necesaria una evaluación de la capacidad de simulación del modelo en las condiciones de suelo, clima, cultivo y manejo existentes en la zona. Con esta finalidad, la capacidad del modelo de simulación CropSyst 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 y col. (1996) y Ferrer y col. (1997b) en la zona de estudio, y en otras condiciones por Stockle y col. (1994), Pala y col. (1996), Stockle y Debaeke (1997), Stockle y col. (1997) y Donatelli y col. (1997). En el presente estudio, y previamente a la aplicación del modelo para la evaluación de las prácticas de manejo de la fertilización N en la zona, 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 en el Capítulo I. 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.

4.2. Material y métodos

El modelo

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

Datos experimentales

Para la calibración y validación del modelo se utilizaron datos obtenidos de los experimentos de campo descritos con detalle en el apartado de Material y Métodos del Capítulo I (ver Tabla 1.2 y 1.3 Cap. I). Dichos experimentos consistieron 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 cultivo maíz 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 x 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 aplicado cada 10-14 días. Para cada experimento se dispuso de una analítica del horizonte superficial (ver Tabla 1.1, Cap. I) y de una descripción del perfil del suelo. Se obtuvieron datos climáticos diarios acumulados de precipitación y radiación solar, y datos diarios medios de temperatura máxima y mínima, humedad relativa y velocidad del viento, de la estación automática de la red del DARP situada en Palau d' Anglesola. Durante el ciclo de cultivo se realizaron muestreos de suelo para determinar el contenido de N-NO₃ y agua en el perfil del suelo, se controlaron los estadios de desarrollo del cultivo, se tomaron muestras destructivas para seguir la acumulación de biomasa y nitrógeno y el contenido de N de la parte aérea del cultivo, y en cosecha se determinó la biomasa y el rendimiento. Para más detalles sobre el calendario y los métodos de campo referirse a la Tablas 1.4 y 1.5 (Capítulo I).

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. Las características del horizonte superficial de los suelos utilizados en las simulaciones se detallan en la Tabla 2.1. Para los horizontes sub-superficiales se consideró la misma densidad aparente que en superficie, y en todos los casos la textura fue parecida. El contenido de elementos gruesos en el suelo (EG) se tuvo en cuenta en el cálculo de los parámetros hidráulicos del suelo. En las parcelas P-3 y P-5, donde había elementos gruesos, se modificó el contenido de agua del suelo en saturación (θ_s) y la conductividad del agua en saturación (K_s) en función de EG, y posteriormente se utilizaron las ecuaciones descritas por Campbell (1985) para estimar la curva característica

del suelo, la densidad aparente y los contenidos de agua del suelo en capacidad de campo y punto de marchitez permanente. Los valores de potencial de entrada de aire (ϕ_e) y el parámetro b de Campbell se mantuvieron invariables.

Tabla 2.1. Características de los suelos utilizadas en las simulaciones (0-30 cm)

Experimento Año	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6
	1996	1996	1997	1997	1997	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

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. Estos valores se consideran típicos para las condiciones semiáridas de la zona de estudio (Stockle, comunicación personal).

Los parámetros requeridos para la simulación de la mineralización neta y denitrificación del N en el suelo fueron calibrados. El Cociente de Ajuste de la Mineralización se varió hasta que la mineralización neta acumulada durante la estación de cultivo se ajustó a la estimada experimentalmente en la parcela P-1 (ver Tabla 1.8, Capítulo I). El parámetro referente a la denitrificación se ajustó comparando los perfiles observados en la parcela P-1-N₃ con los simulados.

Los parámetros de cultivo necesarios en CropSyst se pueden obtener, a partir de medidas directas en campo, del cálculo indirecto a partir de dichas medidas, de valores citados en el manual de CropSyst u otros estudios similares, o bien ajustando el valor de los parámetros como resultado de correr el programa hasta que el resultado de la simulación coincide con los valores observados en campo (calibración), a criterio del investigador. Addiscot y col. (1995) considera la primera opción cómo la más adecuada.

En la Tabla 2.2 se resumen los principales parámetros de cultivo de CropSyst. En primer lugar se obtuvieron los parámetros medidos o deducidos de los datos experimentales. Posteriormente, para ciertos parámetros considerados poco variables (Stockle, comunicación personal), se utilizaron los valores citados en el manual de CropSyst. Finalmente, la calibración de los parámetros restantes se hizo de forma escalonada, empezando con los parámetros fenológicos (ajuste fechas de ocurrencia de los estadios de desarrollo), siguiendo con la calibración de parámetros referentes a aspectos morfológicos y de crecimiento (ajuste de la curva de acumulación de biomasa y área foliar y del rendimiento final), y finalizando con los parámetros referentes al Balance de N (ajuste del N absorbido en madurez fisiológica).

Para la calibración se simularon los tratamientos con dosis máximas de N (N_3) para los experimentos P-1 y P-2. Para estos dos tratamientos se consideró que ni el nitrógeno ni el agua disponibles en el suelo limitaron el crecimiento del cultivo. Este proceso incluyó igualmente una valoración de los componentes del balance de agua y N en el suelo simulados por el modelo. Esta valoración consistió en comprobar que las magnitudes simuladas estaban dentro de un rango razonable, y que fueron consistentes con la evolución

temporal del contenido de N-NO₃ en el perfil del suelo y con la absorción de N por la planta.

Tabla 2.2. Parámetros de cultivo utilizados en las simulaciones

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 _{max}	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 radiación/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)	-1200
Potencial de xilema de marchitez permanente (J kg ⁻¹)	-1800
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)	1000
Grados día a emergencia	70
Grados día a inicio floración (aparición sedas)	1000
Grados día a inicio llenado de grano	1250
Grados día a madurez fisiológica	1800
N-NO ₃ residual por capa de suelo	3

Validación del modelo y análisis de los datos

Los resultados obtenidos de las simulaciones se compararon con los datos experimentales de campo para tener una apreciación de la capacidad predictiva del modelo. La información experimental utilizada para la validación del modelo fue independiente de los tratamientos utilizados para la calibración, de manera que se utilizaron los datos obtenidos de todos los tratamientos excepto P1-N₃ y P-2-N₃. Las parcelas se diferenciaron en el tipo de suelo, fecha de siembra y 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 fotoperiodo, 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) y la adición de N con el agua de riego se simuló mediante aplicaciones de fertilizante en el día de riego. 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 conservación de masa) para el transporte de agua y solutos en el suelo.

El objetivo del presente estudio es tanto la evaluación de las discrepancias entre los datos observados y los valores simulados por el modelo, como sobretodo averiguar el origen y la naturaleza de dichos errores. 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 o otro, de evaluar cambios realizados en el modelo o de evaluar la posible aplicación del modelo para fines de manejo. La fiabilidad de los datos de campo, tanto referidos a los datos necesarios para la inicialización de las simulaciones, cómo a las variables contrastadas, 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 el error total entre un error experimental y un error atribuible a la incapacidad de simulación del modelo. El error experimental (EE) se calcula a partir de la diferencia entre el valor observado de la variable en cada repetición i (O_{ij}) con el valor observado promedio del tratamiento j (O_j). El error de simulación (ES) se calcula de la diferencia entre O_j y el valor simulado para el tratamiento j (S_j), e incluye errores inherentes al modelo (eventos y factores que el modelo no modeliza correctamente, o bien no los considera y son de importancia) y errores debidos a una mala parametrización del modelo. Asimismo, ES también incluye el error resultante de omitir la variabilidad de las condiciones de inicialización de las simulaciones en cada repetición (ej.: contenido inicial de N-NO₃ y agua en el suelo). Hay que señalar que para el presente análisis, los perfiles iniciales de agua y N-NO₃ en el suelo se consideraron iguales para todos los tratamientos y repeticiones en una misma parcela. Asimismo, las

propiedades físicas del suelo necesarias se tomaron como uniformes a nivel de parcela. Paralelamente, se utilizaron algunas de las medidas descriptivas propuestas por Willmott (1982) y Loague y Green (1991), que no incluyen el error experimental de forma explícita, y que permiten separar ES entre un error sistemático y uno de no-sistemático. El error sistemático nos indica si el modelo sobre-predice o infra-predice las variables evaluadas, dándonos idea de algún fallo inherente al modelo o en la parametrización. El término correspondiente al error no-sistemático incluye la variabilidad aleatoria no explicable por el modelo, y atribuible a un error de muestreo y a unas condiciones iniciales de simulación inadecuadas. En este caso, los resultados de las simulaciones se compararon con el valor promedio de cada tratamiento (media de tres repeticiones en P-1, P-3 y P-4, y dos en P-5 y P-6). 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.



Otro análisis gráfico de utilidad es la representación de la relación entre el N absorbido y biomasa acumulada. Representaciones similares para los valores simulados y observados indicarían que el modelo simula correctamente la respuesta del cultivo al N disponible en el suelo y su relación con el crecimiento de la planta. De igual manera, 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 permite comprobar la habilidad 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).

4.3. 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 Figura 2.1 se comparan gráficamente los valores simulados con los datos observados de rendimiento (a), biomasa final (b) y N absorbido (c).

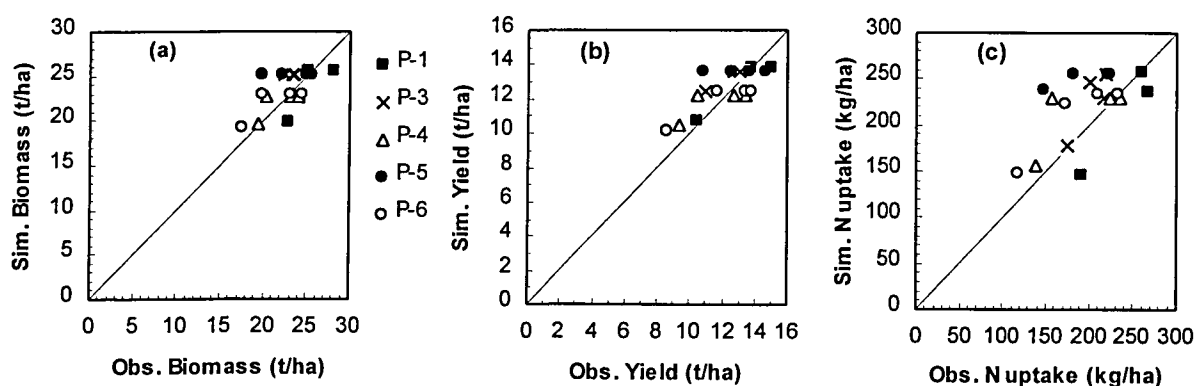


Figura 2.1. Valores simulados vs. datos observados de rendimiento (a), biomasa final (b) y N absorbido por el cultivo (c).

En la Tabla 2.3 se detallan los diferentes índices estadísticos calculados para el análisis de las diferencias entre los valores simulados y los valores observados.

Tabla 2.3. Índices estadísticos para evaluar los resultados de la simulación

	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: $100 \cdot (\text{RMSE}/O_{\text{avg}})$; EF: Eficiencia del modelo (Loague y Green, 1991); d: Índice de concordancia (Willmott, 1982); RelRMSE_s: $100 \cdot (\text{RMSE}_s/O_{\text{avg}})$; RelRMSE_u: $100 \cdot (\text{RMSE}_u/O_{\text{avg}})$; RSS: Suma de cuadrados de (O_{ij}-S_j) (Whitmore, 1991); SSE: suma de cuadrados atribuible al error. Para más detalle referirse al Apéndice I.

La observación de los gráficos 1:1 muestra que en general el modelo sobre-predice las variables evaluadas, pero sin que las divergencias entre los valores observados y simulados sean excesivas. Este hecho se confirma comparando las medias de las variables comparadas en la Tabla 2.3 (O_{avg} y S_{avg}), que en todos los casos no se diferencian en más de un 12% (respecto a la media observada). No obstante, en la Figura 2.1, se pueden detectar mayores divergencias para valores pequeños, en general, correspondientes a los tratamientos control (N-0). La aparente insensibilidad del modelo para simular la respuesta del cultivo a bajos niveles de N disponible se puede entender teniendo en cuenta que, no se dispusieron de medidas repetidas del contenido inicial de N-NO₃ en el suelo y que se utilizó el mismo perfil para todos los tratamientos de una misma parcela. A esta fuente de error se le suma la poca fiabilidad de las estimaciones del N-NO₃ aportado con el agua de riego, aportaciones que pueden llegar a ser importantes en el cultivo del maíz (Ferrer y col.,

1997a). Esta inexactitud en los datos de entrada podría explicar el mal comportamiento del modelo para estos escenarios limitantes en N. 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 (Tabla 1.9, Capítulo I) y la distorsión que este efecto ocasiona en los rendimientos simulados para los tratamientos con poco nitrógeno.

Los índices estadísticos indicativos del tamaño relativo de la diferencia entre los datos observados y las predicciones del modelo (RelRMSE, d y EF) indican que el error cometido es proporcionalmente mayor en la simulación del N absorbido (mayor valor de RelRMSE y valores más cercanos a cero de los índices d y EF) que en la simulación de la biomasa y el rendimiento. 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 es más favorable utilizar el promedio de los datos observados que las predicciones hechas por el modelo. Este hecho radica en que el N absorbido es el resultado de multiplicar dos variables independientes, biomasa y contenido de N de la planta, los cuales llevan asociados sendos errores experimentales y de simulación. La relación (SSE/RSS) sugiere que en el caso del N absorbido la suma de cuadrados debido al error experimental es un 19% de la suma de cuadrados total, mientras que para la biomasa y el rendimiento esta relación está alrededor del 30%. Tal como se ha aclarado anteriormente, la simulación del N absorbido por el cultivo conlleva un mayor error asociado al modelo. La relación (MSEs/MSE) confirma que para las tres variables de interés, entre un 45 y un 61% del error atribuible a una mala simulación es sistemático (explicado por la regresión lineal entre S_j y O_j). Para realizar un análisis más profundo de las discrepancias observadas es necesario observar con más detalle la relación entre la biomasa acumulada y el N

absorbido, las curvas de evolución del N y la biomasa acumulados por el cultivo, así como la evolución temporal del contenido de N-NO₃ en el suelo.

La representación gráfica de la relación entre la biomasa acumulada y el N absorbido por el cultivo (Figura 2.2) nos permite estudiar de forma cualitativa si el modelo es capaz de integrar los efectos sobre el crecimiento del N absorbido, conjuntamente con la intercepción de luz por la cubierta y el estatus hídrico de la planta. El método de Cate-Nelson (Cate y Nelson, 1971) permite dividir los valores de biomasa a partir de un nivel alrededor de 230 kg N ha⁻¹ de N absorbido, tanto para los datos observados como para los simulados. En ambos casos, para un valor de 230 kg ha⁻¹ N absorbido, se obtendrían sobre las 25 t ha⁻¹ de biomasa.

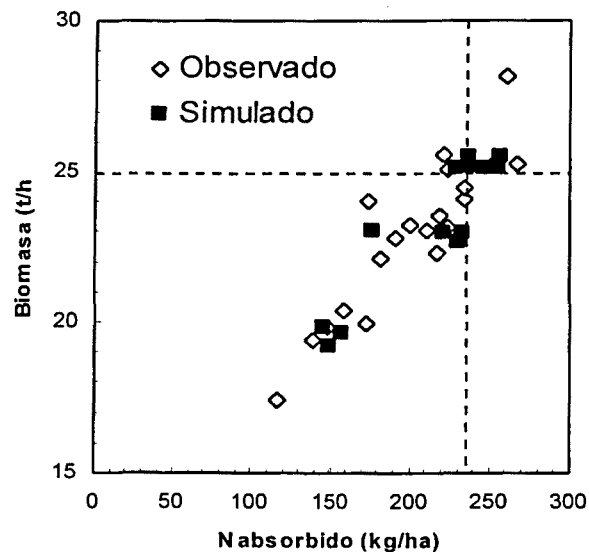


Figura 2.2. Relación entre biomasa final y N absorbido por el cultivo. Datos observados y simulados

Si se calcula la inversa de la pendiente de la regresión lineal entre las dos variables, se obtiene que se necesitan 18 kg N t⁻¹ biomasa y 20 kg N t⁻¹ biomasa para los valores

observados y simulados, respectivamente. Se deduce en cierta forma, que el modelo predice adecuadamente la respuesta del crecimiento al N absorbido por el cultivo.

Las Figuras 2.3 y 2.4 permiten una evaluación más detallada de los resultados obtenidos en la parcela P-3. La Figura 2.3 muestra como 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 muestra cierto desajuste, sobretodo durante el periodo correspondiente al crecimiento vegetativo y floración. El modelo parece simular un ritmo de crecimiento superior al observado en campo. Este desajuste podría estar relacionado con la calibración del parámetro de “Temperatura por debajo la cual se ralentiza el crecimiento” que reduce el crecimiento en el periodo inicial del ciclo, o bien relacionado con la estimación a partir de los datos de campo de la “Área foliar específica” y del “Coeficiente de partición hoja/tallo”, que determinan en gran manera el ritmo de crecimiento. Observando las curvas de acumulación de N del cultivo se aprecia como el modelo sobrestima el ritmo de acumulación de N, sobretodo durante el periodo de crecimiento activo y floración. Parte de dicho desajuste se podría atribuir al excesivo crecimiento simulado por el modelo, y en parte, se podría asimilar a que el modelo simula contenidos de N-NO₃ en el suelo superiores a los observados y que son absorbidos por el cultivo. Este último aspecto queda en entredicho si se observan los perfiles de N-NO₃ en el suelo representados en la Figura 2.4. Se puede apreciar como el modelo predice de forma bastante adecuada la evolución del perfil de N-NO₃, incluso teniendo en cuenta la magnitud del error experimental observado en algunas de las observaciones. Este no es el caso para los perfiles simulados en la parcela P-4 (datos no mostrados), donde el modelo fue incapaz de simular el movimiento del N aportado, tal y como se observó experimentalmente. En

este caso, se atribuye el error a que en dicha parcela se produjo un transporte de N mediante transporte preferencial a través de las grietas que existían en dicho suelo debido a su textura extremadamente arcillosa, y que el modelo es incapaz de simular.

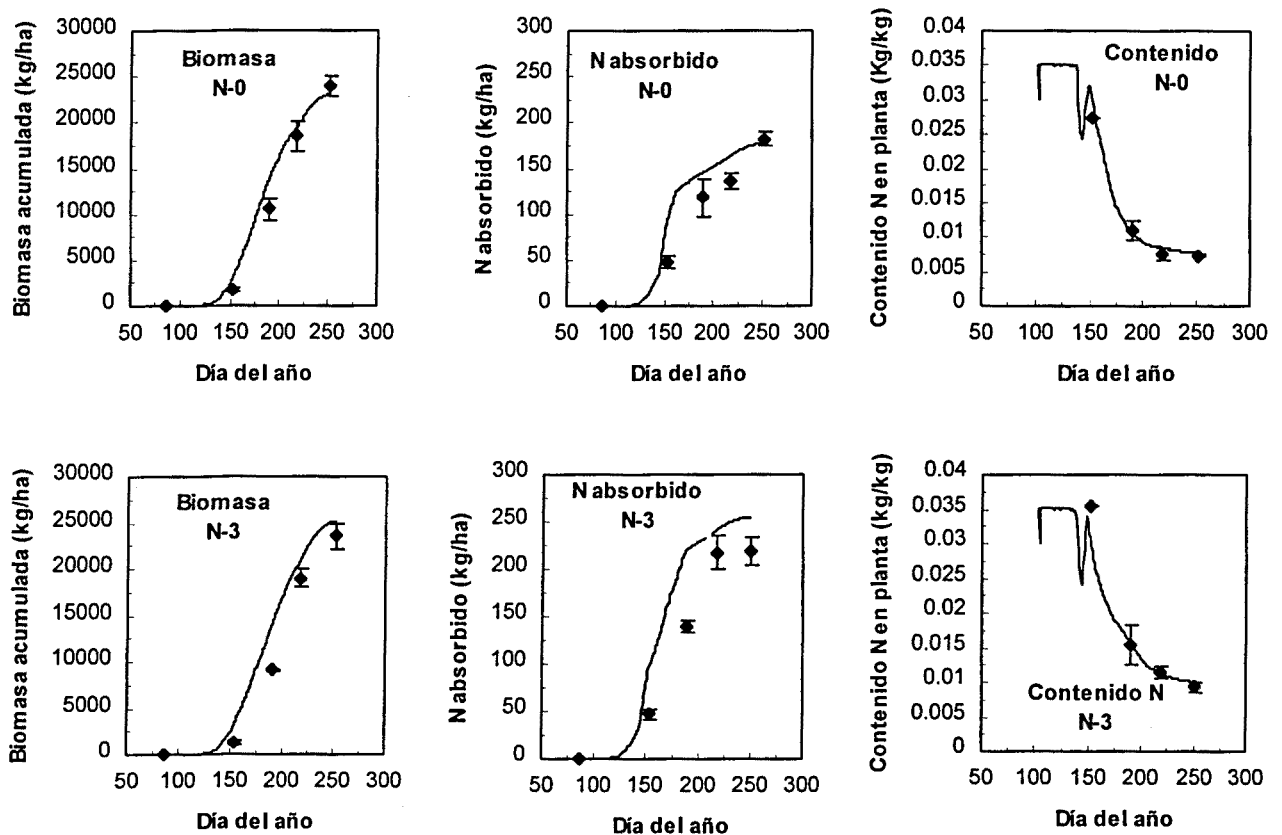
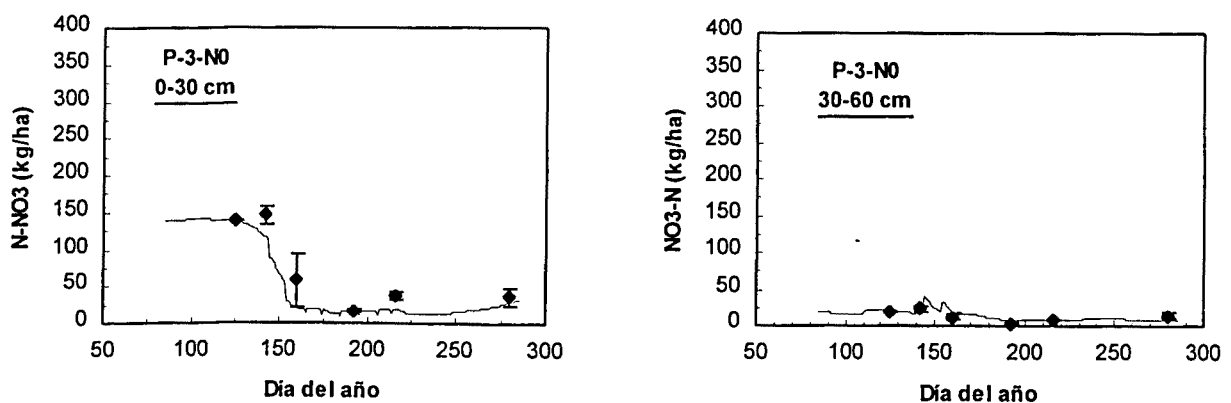


Figura 2.3. Curvas de evolución de la biomasa y el N acumulados por el cultivo y del contenido de N en planta, en la parcela P-3. Las notaciones N-0 y N-3 se refieren los tratamientos nitrogenados con 0 UN y 300 UN aplicados en cobertera, respectivamente.



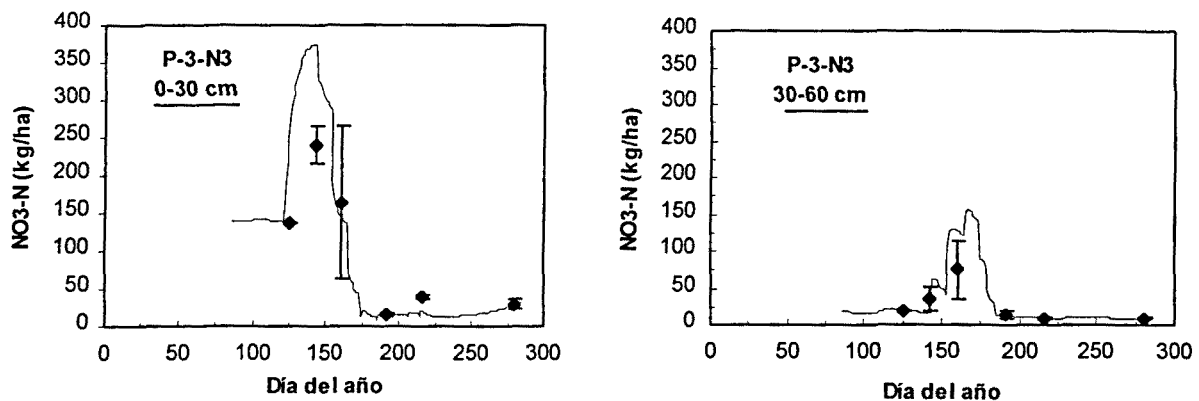


Figura 2.4. Evolución del perfil de N-NO₃ en el suelo durante el periodo de crecimiento, en la parcela P-3. A 60 cm se encuentra una capa de gravas y una capa freática. Únicamente se representan aquí los perfiles para el tratamiento control (N-0) y para el que recibió mayor dosis nitrogenada (N-3).

La diferencia media entre los valores observados y simulados de N absorbido 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 inducir del análisis realizado, la interpretación de los índices estadísticos da poca información sobre la naturaleza de las discrepancias entre los datos experimentales y los simulados. El estudio de los gráficos da 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 éste 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 estadísticos sería de mayor interés en situaciones dónde se desee realizar una preselección del modelo a utilizar, dónde 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 del modelo.

Es siempre muy importante comprobar la calidad de los datos experimentales (variabilidad espacial, errores en los datos climáticos y estimación de las propiedades hidráulicas del suelo, principalmente). También hay que tener presente las limitaciones de los datos experimentales al evaluar ciertos aspectos del modelo. A modo de ejemplo, si no se hubieran observado en campo diferencias entre los tratamientos nitrogenados, sería difícil querer comparar el comportamiento del modelo en condiciones limitantes de N. este aspecto está relacionado con la necesidad de tener un conocimiento profundo de los algoritmos que utiliza el modelo. En todos los casos, es de vital importancia una estrecha colaboración entre el equipo que ha desarrollado el modelo, la persona que ha realizado los experimentos de campo y el usuario.

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, año climático y textura del suelo, hace mucho más difícil y confusa la evaluación de un modelo complejo como CropSyst. Todos estos factores afectan de algún modo los componentes del balance de N y agua en el suelo y el crecimiento del cultivo. Asimismo, el experimento se realizó en parcelas comerciales, dónde 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.

4.4. Conclusiones

Los datos experimentales disponibles permitieron una validación extensa 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 hace un trabajo razonable en la simulación de la demanda de N por el cultivo y de 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, 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 el cálculo de la 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.

5. CHAPTER III. Assessing field and regional nitrogen fertilizer recommendations for corn using a cropping systems simulation model and GIS.

5. ASSESSING FIELD AND REGIONAL NITROGEN FERTILIZER RECOMMENDATIONS FOR CORN USING A CROPPING SYSTEMS SIMULATION MODEL AND GIS

Abstract

In this chapter, CropSyst Suite was used at a field scale to investigate the lack of precision associated to the use of a single value of the Pre-Sidedress Soil Nitrate Test (PSNT) to differentiate responsive from non-responsive fields. This critical PSNT ($PSNT_{crit}$), defined as the of soil NO_3 -N content beyond which there is no crop response to sidedressing N fertilizer, may be different depending on soil type and climatic conditions during the growth period. In the second part of the study, CropSyst Suite helped comparing the effect at a regional scale of three recommendation strategies. The model was able to simulate yearly variations of the $PSNT_{crit}$ and to differentiate the two simulated soils (L: Loam and SCL: Silty-Clay-Loam). In addition, a probability of error was associated to the decision of deciding weather a field will be responsive to N fertilizer, considering two risk attitudes (conservative and risky). The analysis of the simulations at a regional scale showed a reduction of general N fertilization loads when the alternative recommendation systems are used. However, this reduction implied a general diminishment of yields, as well as N losses through leaching. Effective soil depth and soil texture to a lesser extent, were the most determinant factors when explaining differences among soil groups. For the three simulated N fertilizer recommendation systems, the effects of the yearly climatic variations on the applied N rate, yield and N loss through leaching were less important.

5.1. Introduction

CropSyst Suite (Stockle and Nelson, 1998) is a multi-year, multi-crop, daily time-step crop simulation model, with a friendly user interface that has proven useful at simulating soil-plant N and water budgets, crop phenology, crop canopy, biomass production and crop yield for different conditions (Pala et al., 1996; Stockle et al., 1994; Stockle and Debaeke, 1997; Donatelli et al., 1997). The model has the capacity to specify management options like irrigation, N fertilization, cultivar selection, crop rotation, soil and irrigation salinity as well as tillage operation and residue management. The user is also able to differentiate different soils, based on selected profile physical parameters like bulk density and water content at field capacity and permanent wilting point. A revised version of ClimGen (Ndluvu, 1994) is also incorporated into CropSyst Suite. ClimGen is a weather generator that is able to simulate long-term series of daily weather data based on historical data on precipitation, maximum and minimum temperatures and solar radiation. Finally, the simulation pack has implemented a link to Arcview/ArcInfo, a Geographical Information System (GIS). A GIS is a set of computer related tools that can help visualization of spatial distributed data, and displaying and performing sophisticated analysis on a regional scale. Selection of CropSyst among other simulation models with similar capabilities rely on the good performance shown by the model in different scenarios, the familiarity of the authors with the model's algorithms and the existing cooperation between the authors and the model developer. Local experimental data sets are needed for model performance evaluation, in order to know simulation capabilities. CropSyst has been tested for N balance and crop production for the conditions of the study area in Chapter II. Model

simulation capabilities allow the user to define site-specific scenarios and to perform dynamic and complex analysis of cropping systems behavior and to assess the interacting effects of soil type, weather variability and management practices on productivity, non-point source pollution assessment derived from $\text{NO}_3\text{-N}$ and pesticide loss, economical feasibility and risk assessment (Stockle, 1996). The weather generator incorporates a long-term scope into the analysis that gives opportunity to evaluate inter-annual weather variability consequences. The GIS can be used by the user to consider the effect, on the output variables of interest, of spatial distribution of soils, management practices and weather conditions when performing an analysis on a regional base. This complete analysis of a cropping system, if used properly and accordingly to model capabilities, can be a very helpful tool to support site-specific agricultural management decisions and recommend Best Management Practices (BMP) on a field, regional or state wise (Corwin et al., 1998). Examples of applications of such computer-based analytical tools are currently being more available. The evaluation of the effect of weather, soil and targeted management practices variability in a temporal and spatial scale can be used for regional planning and policy analysis, by defining management alternatives, identifying areas with high productivity and by developing management recommendations for the cropping systems of the area (Lal et al., 1993). The same author cited studies that discussed some of the capabilities of crop simulation model technologies for agricultural management decisions and planning at various scales. Stockle (1996) pointed out the scope of possibilities that simulation technologies have for agronomic researchers, such as to overcome limitations of agronomic experimentation (number of years, soil types and management conditions), to set research priorities, to revise breeding programs, to seek for alternative soil and crop management

alternative options and to support process of technology transfer. The same author showed an example of how management of dryland cropping systems in the Pacific Northwest can be improved. Badini et al. (1997) used CropSyst for predicting the productive capacity in a national scale and defining agroclimatic zones in Burkina Faso (West Africa) based on water-limited conditions. They outline some other possible applications based on this analysis such as crop productivity forecasting, water management and comparison of new crop cultivars. Another recent application, have been the assessment of the possible effects of climate change on agriculture productivity (Curry et al., 1990 cited by Lal et al., 1993). Nevertheless, some precautions and limitations are associated with the use of crop models, weather generators and GIS. Stockle (1996) considered that crop modeling is only a complement to agronomic experimentation. Local experimental data sets are needed for model calibration and validation. In addition, effective communication between the modeler and the user is needed to improve simulation accuracy. Other factors that may be a source of error are related to the construction of a suitable regional database (weather, soils and land use) to implement to the GIS, the use of adequate and reliable pedo-transfer functions (to transform available soil data into soil parameters needed by the model) and problems of spatial scaling (Corwin et al., 1998).

This study pretends to expose how a simulation model such as CropSyst Suite can be used to expand the conclusions obtained from local field experiments (see Chapter I), and second, to compare the effect at a regional scale of three recommendation strategies. In both cases, CropSyst allowed to incorporate the effect of annual weather variability and soil type into the analysis. In the first part, CropSyst was used to investigate the lack of

precision associated to the use of a single value of PSNT to differentiate responsive from non-responsive fields. This critical PSNT ($PSNT_{crit}$), defined as the of soil NO_3 -N content beyond which there is no crop response to sidedressing N fertilizer, may be different depending on soil type and climatic conditions during the growth period. A reliable field test to identify responsive and non-responsive sites is an important step towards avoiding N excess scenarios. In the second step, three N fertilizer recommendation systems were compared in a long term and at a regional scale for continuous irrigated corn, in the base of their effect on crop productivity, fertilizer application and environmental pollution. The control recommendation system consisted on following the general practice in the area, where farmers apply a fixed N rate regardless of the NO_3 -N in the soil, yield goal or previous crop. The first alternative methodology basically takes the N requirements associated to a pre-defined yield goal and subtracts the soil NO_3 -N at pre-planting (Pre-Planting Soil Nitrate Test, PPNT). The second system is based on a critical PPNT level obtained from experimental data, and N fertilizer is added to the simulated PPNT level to reach the critical level, considering a standard N fertilizer use efficiency. The substitution of the PSNT by the PPNT was done to facilitate the introduction of this management option into the model source-code.

5.2. Materials and methods

All simulations neglected crop response to soil salinity, CO_2 atmospheric concentration, vernalization and photoperiod. Residue at harvest was considered very low, no organic fertilizer was applied, no water table was implemented and irrigation water was taken as free of N. The Finite Difference option for water and solute transport in the soil was

chosen. Crop parameters were obtained from the parametrization process explained in Chapter II, and soil hydraulic properties were estimated from soil particle distribution data from the area's soils database (Herrero et al., 1993), using the equations implemented by CropSyst. Historical weather data series from Lleida (located in the outskirts of the study area) were used by ClimGen to generate thirty years of daily average T_{\max} , T_{\min} and daily-accumulated rainfall and solar radiation.

To achieve the first outlined objective six N fertilizer rate trials were simulated for each of the thirty generated years. Each simulated experiment corresponded to six increasing soil $\text{NO}_3\text{-N}$ content levels (0-90 cm) at pre-planting (130, 150, 170, 190, 210 and 250 $\text{kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$, named NM_1 to NM_6) combined with a non-limiting N fertilizer rate (250 UN, N_{250}) and a zero N fertilizer treatment (0 UN, N_0). No fertilizer was applied at pre-planting, planting date was fixed around the usual date in the area (15 April) and initial soil profile water content was set to field capacity. A typical irrigation management was set, with seven irrigation events, 100 mm per event, starting on June 1st and ending on August 12th in every simulated season. For each year, a potential yield was defined from simulating a non-limiting N scenario (NM_6 with N_{250}). Furthermore, each of the soil $\text{NO}_3\text{-N}$ levels combined with the non-fertilized treatment (N_0) were simulated and a critical NM value was identified, as the soil $\text{NO}_3\text{-N}$ content below which the resulting grain yield is less than 95% of the potential yield. This criterion is an adaptation from Sexton et al. (1996). The soil $\text{NO}_3\text{-N}$ profile prior to sidedressing was provided as an output, and therefore, a critical PSNT was obtained for each of the thirty simulated years. This analysis was done for two contrasted soils in the area, a Silty Clay Loam soil (SCL) that covers around 60% of the

area, and a Loam soil (SL) that represents only a 10% of the area (Table 3.1). The soils were considered homogeneous with depth. Some of the most determinant hydraulic properties of the soils used in the simulations are shown in Table 3.1.

Table 3.1. Characteristics of the SCL and the SL soils considered

	Silty Clay Loam	Loam
Depth (m)	0.9	0.9
Bulk density (kg m^{-3})	1380	1410
Permanent Wilting Point ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0.19	0.125
Field capacity ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0.36	0.263
Sand (%)	10	40
Silt (%)	55	40
Clay (%)	35	20
Organic matter content (%), 0-30 cm	2.4	2.4

In the second application, the exhaustive soil information available from a main section of the area (Herrero et al., 1993) was used to aggregate the existing cartographic units into twenty one distinctive soil groups (Table 3.2). The groups were defined according to their physiographic unit, effective soil depth, and surface and subsurface soil texture. The area covered by the digitized map was around 11.300 ha. The soils map was available as a digitized map, and the CropSyst-GIS cooperation utility was used to link the soils database with the implemented simulations.

Table 3.2a. Description and percentage of the covered area of the digitized map, for the soil groups used in the simulations.

Soil Group	Effective depth (cm)	Surface texture	Sub-surface texture	Coarse Elem. [*] (%)	Covered area (%)
A. Soils developed on lutites and sandstones					
A-1	0-40	Fine	-	None	0.9
A-2	0-40	Medium	-	5	5.7
A-3-4	0-40	Coarse	-	2	1.5
A-5	0-70	Coarse	Coarse	2	0.1
A-6	0-70	Medium	Coarse	2	0.1
A-7	0-70	Medium	Medium	5	16
A-8	0-70	Fine	Medium	2	1.7
B. Soils developed on calcareous deposits					
B-1	0-40	Medium	-	15	3.9
B-2	0-40	Coarse	-	10	2
B-3	0-70	Medium	Medium	10	1.8
B-4-8	0-70	Fine	Medium	10	2.1
B-5	0-100	Medium	Medium	10	10
B-6-7	0-100	Coarse	Medium	5	1.4
C. Soils developed on fine materials					
C-1	0-130	Fine	Fine	None	22.5
C-2	0-130	Medium	Fine	2	5.1
C-3	0-130	Fine	Medium	2	3.8
C-4	0-130	Coarse	Medium	2	3.3
C-5-6	0-130	Medium	Medium	2	14.9
C-7	0-130	Medium	Coarse	2	0
C-8	0-130	Coarse	Coarse	2	1.3
C-9-10	0-70	Medium	Medium	2	2.2

* Referred to the surface horizon

Table 3.2b. Soil characteristics associated to the texture classes for the surface horizon, considering absence of coarse elements.

Texture group	B. Density (kg m ⁻³)***	Texture class**	% Silt	% Clay	θ_{fc}^* (m ³ m ⁻³)	θ_{pwp}^* (m ³ m ⁻³)
Fine	1380	SiCL	55	35	0.357	0.189
Medium	1410	L	40	20	0.263	0.125
Coarse	1440	SL	25	10	0.206	0.094

* θ_{fc} and θ_{pwp} are volumetric water contents at field capacity and permanent wilting point, respectively; ** SL (sandy-Loam), L (Loam), SiCL (Silty-Clay-Loam), *** For the sub-surface horizon the bulk density values were 1410, 1440 and 1470 kg m⁻³ for fine, medium and coarse texture group, respectively.

The three N fertilizer recommendation algorithms implemented into the management files were as follows:

- FIXED DOSE:** 100 kg N ha⁻¹ applied as Urea two days before planting + 180 N kg ha⁻¹ applied as Ammonium Nitrate at sidedressing.
(Fixed)
- BALANCE BASED:** 240 kg N ha⁻¹ was taken as the N required for a potential yield of 14 t ha⁻¹ of grain (from experimental data). The N applied as fertilizer was calculated by subtracting the PPNT (0-30 cm) level from the N required. Fertilizer use efficiency is assumed to be 100% in this case. All N fertilizer was applied at pre-planting
(Balance)
- PPNT_{crit} BASED:** A critical PPNT level of 100 kg ha⁻¹ (0-30 cm) was considered (from experimental data). The N applied as fertilizer was calculated by subtracting the PPNT (0-30 cm) level from the PPNT_{crit}. A N fertilizer use efficiency of 50% was considered. All N fertilizer was applied at pre-planting.
(PPNT_{crit})

Figure 3.1 shows the N fertilizer dose applied by each of the recommendation systems as a function of the NO₃-N level at pre-planting (0-30 cm). Note that the Fixed Dose strategy applies the most, while with the PPNT_{crit} system less N fertilizer is applied.

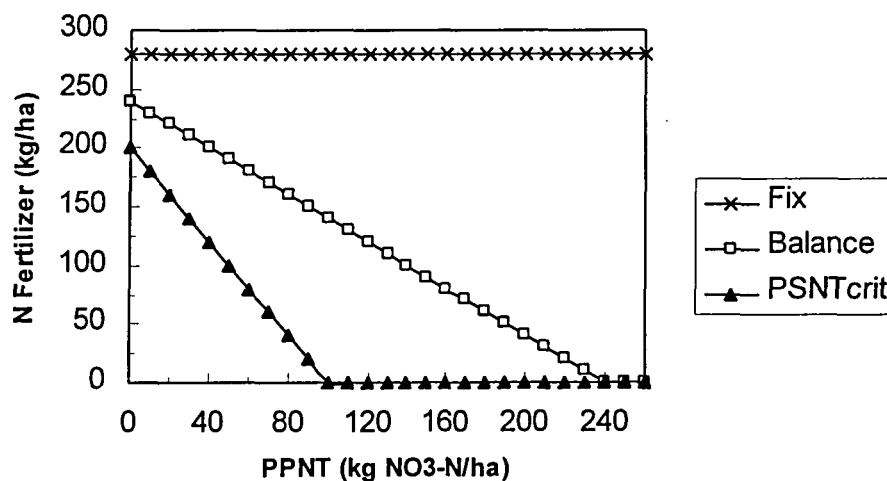


Figure 3.1. N fertilizer applied at pre-planting for each of the recommendation systems, as a function of the PPNT level.

The 280 kg N ha⁻¹ applied every year in the first strategy would correspond to a prudent farmer, since most of them apply higher N rates. A sampling depth of 0-30 cm for PPNT was considered for being the routine sampling depth used by the Laboratori d'Anàlisi i Fertilitat de Sòls (LAF). In the Balance Based strategy was assumed that the NO₃-N present in the subsurface horizons compensates for considering a 100% fertilizer use efficiency. Thirty years of continuous corn were simulated for each combination of soil group and N fertilizer recommendation system. At the beginning of each simulation the soil was filled up to field capacity and the NO₃-N content in the soil profile was set to 160 kg N ha⁻¹. During the thirty-year simulation, corn was planted on April 15 every year and the irrigation calendar was as defined in the previous study.

5.3. Results and discussion

Field scale analysis

Justification of yearly variations of critical PSNT levels should be explained on the basis of the climatic conditions during the growing season and its effects on the N demand by the crop and on the N supply capacity of the soil. Crop N demand is directly related to the potential yield and the simulated year differences may be attributed to variations on the potential evapotranspiration (ET_p) and growth, and to the temperature effects on the phenologic calendar (it mainly determines the length of the active growth period). Soil N supply capacity can be interpreted as the resulting combination of contributions from net N mineralization, NO₃-N redistribution within the profile and N loss through leaching. Net N mineralization variations did not change much among years (average value of 78 and 84 kg N ha⁻¹ for the L and SCL soils) and therefore, variations on simulated soil N availability

were more related to the effects of precipitation and irrigation on $\text{NO}_3\text{-N}$ transport within the soil and N leaching below the rooting depth. Figure 3.2a and 3.2b show the variations of yearly-simulated maximum yield, accumulated precipitation during the growth period and critical PSNT. High yields and low precipitation should go together with high N demand and important N loss through leaching, and thus, higher $\text{PSNT}_{\text{crit}}$ levels. This was only evident in some of the simulated years (ex.: year twelve and twenty four). Deviations from the expected results may be mainly related to subsurface $\text{NO}_3\text{-N}$ accumulation below the rooting depth before sampling. Moreover, examination of precipitation distribution within the growing season would be necessary to get a better understanding the relation between maximum yield, precipitation and $\text{PSNT}_{\text{crit}}$.

$\text{PSNT}_{\text{crit}}$ oscillated between 42 and 118 $\text{kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$ and between 51 and 110 $\text{kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$ for the Loam (L) and Silty Clay Loam (SCL), respectively. Comparing the coefficient of variation for the two soils, 21% for the L soil and 17% for the SCL, one can conclude that the effect of yearly weather variability will be more accentuated in irrigated corn grown in a Loam soil. An explanation for this behavior is that, in the Loam soil, $\text{NO}_3\text{-N}$ redistribution and N loss through leaching are more accentuated than in the SCL soil. These simulated $\text{PSNT}_{\text{crit}}$ values could be considered as reasonable as the preliminary $\text{PSNT}_{\text{crit}}$ levels derived from the field experiments (69 to 104 $\text{kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$, 0-30 cm) fell inside the simulated interval.

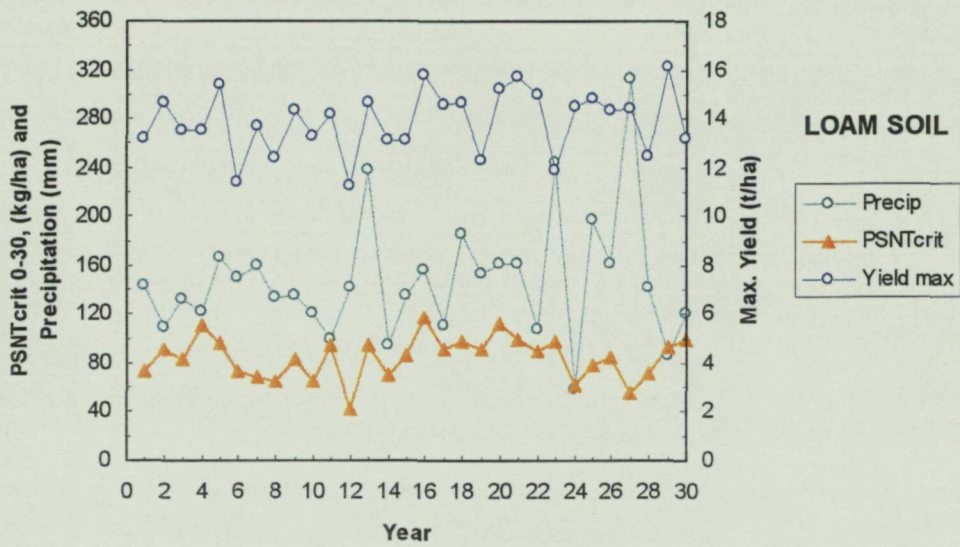


Figure 3.2a. Variation of yearly-simulated maximum yield, accumulated precipitation during the growth period and critical PSNT for N fertilizer crop response. Loam Soil (L).

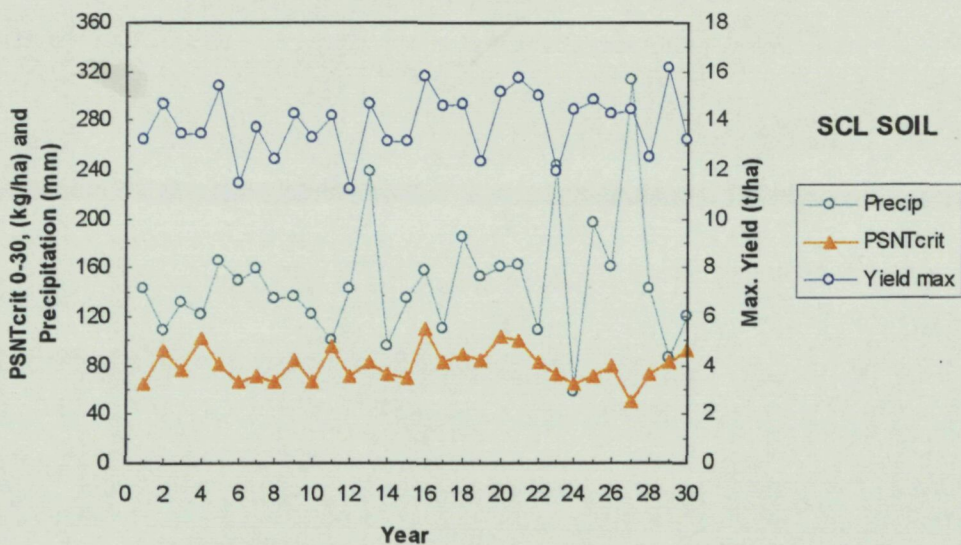


Figure 3.2b. Variation of yearly-simulated maximum yield, accumulated precipitation during the growth period and critical PSNT for N fertilizer crop response. Silty Clay Loam soil (SCL).

If the $PSNT_{crit}$ levels obtained from the simulations are arranged according to their size, a cumulative probability graph may be plotted as in Figure 3.3. Based on this graph, two $PSNT_{crit}$ values could be defined corresponding to a 90% and 50% accumulated

probability. The 90% value may be associated to a conservative value, meaning that the probability to have a smaller $PSNT_{crit}$ for a given year is higher than 90%, while for the 50% value there is only a 50% probability to have a smaller $PSNT_{crit}$ for a given year.

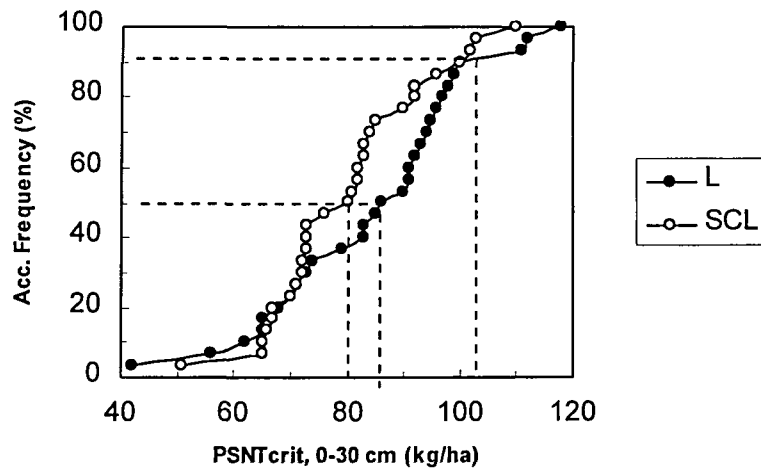


Figure 3.3. Cumulative probability graph of critical PSNT values from the thirty simulated crop seasons.

To further check the robusticity of using a unique value for $PSNT_{crit}$, a table like Table 3.3a and 3.3b can be constructed. Shaded cells indicate the probability (proportion of years out of thirty) that the field is identified as RESPONSIVE when it is NON-RESPONSIVE (N is applied in excess). Clear cells indicate the probability (proportion of years out of thirty) that the field is identified as NON-RESPONSIVE when it is RESPONSIVE (Shortage of N).

Table 3a. Probability of error when identifying responsive and non-responsive fields depending on the measured PSNT level for the Loam Soil (L).

PSNT 0-30 cm (kg/ha)	Risky level	Conservative level
	PSNT _{crit} = 86	PSNT _{crit} = 100
	Probability of error (%)	Probability of error (%)
≤ 40	0	0
40-46	3	3
47-53	3	3
54-60	7	7
61-67	17	17
68-74	33	33
75-81	37	37
82-88	50	50
89-95	27	73
96-102	10	10
103-109	10	10
110-116	3	3
≥ 117	0	0

Table 3.3b. Probability of error when identifying responsive and non-responsive fields depending on the measured PSNT level for the Silty Clay Loam Soil (SCL).

PSNT 0-30 cm (kg/ha)	Risky level	Conservative level
	PSNT _{crit} = 80	PSNT _{crit} = 100
	Probability of error (%)	Probability of error (%)
≤ 46	0	0
47-53	3	3
54-60	3	3
61-67	20	20
68-74	43	43
75-81	47	50
82-88	27	73
89-95	17	83
96-102	7	7
103-109	3	3
≥ 110	0	0

In the Loam soil if the PSNT measured in the field is below 40 kg N ha⁻¹ or above 117 kg N ha⁻¹, the user will correctly identify the responsiveness of the field every year (0%

probability of error), regardless of the $PSNT_{crit}$ value that is chosen. In this case, when the field PSNT levels are between 70 and 100 kg N ha⁻¹, the effect of yearly weather variations will be more apparent. In the Silty Clay Loam, the edge PSNT values that ensure 0% probability of error are 46 and 110 kg N ha⁻¹, regardless of the $PSNT_{crit}$ value that is chosen. In this soil, the interval of field PSNT levels where the risk is highest was limited to 70 - 90 kg N ha⁻¹. Some caution should be taken when analyzing the results from Table 3.3. Note that there would be some changes if some of the conditions of the simulations were changed such as: irrigation management and pre-planting NO₃-N distribution within the profile among others.

Regional analysis

Looking at Table 3.4, it can be seen that by using the alternative N fertilizer recommendation systems, total N loads into the area (11.300 ha) were reduced by a 31 and a 53 % for the Balance and the $PSNT_{crit}$ systems, respectively, while grain yield depression due to a shortage of N oscillated between a 2 and a 5%. These data represent average values for all soil groups and thirty simulated years. Concerning to the environmental side-effects of using either recommendation system, it is clearly noticeable the great reduction of N losses through leaching that occurs when using the two alternative recommendation systems, reaching as much as a 45% reduction for the $PPNT_{crit}$ system (compared to the Fix Dose system).

Table 3.4. Global long-term yearly average values of simulated Grain yield, N applied, crop N uptake, and N leached below the rooting depth.

	Grain Yield (t ha ⁻¹ y ⁻¹)			N applied (kg ha ⁻¹ y ⁻¹)			N Uptake (kg ha ⁻¹ y ⁻¹)			N Leached (kg ha ⁻¹ y ⁻¹)		
	Fix	Balance	PPNT	Fix	Balance	PPNT	Fix	Balance	PPNT	Fix	Balance	PPNT
Average	11.8	11.1	10.9	280	197	133	209	180	167	157	133	96
Maximum	13.9	13.9	13.9	-	219	154	261	261	245	264	244	194
Minimum	5.1	3.3	3.2	-	160	103	99	14	15	37	15	2
CV (%)*	28	35	36	-	10	9	29	50	49	47	59	71
SUM** (t ha⁻¹ y⁻¹)	142900	138300	136400	3200	2200	1500	2589	2368	2195	1455	1154	793

* Coefficient of Variation of long-term average values among Soil Groups. ** Resulting sum of multiplying simulated long-term average values for each Soil Group by the area that occupies. The sum of the digitized area was 11300 ha.

A simple monetary calculation can be done to study whether yield reduction due to N shortage was compensated by the saving cost of N rate application reductions. For this analysis, the unit price of corn grain was set to 25 PTA kg⁻¹ and the price of the Unit of N (UN) was set to 80 PTA kg N⁻¹. At a regional level, yearly average grain yield reduction simulated by both alternative systems was not compensated by the reduction of applied fertilizer, mainly as a result of low N fertilizer prices. However, economical quantification of the environmental impact derived from N loss through leaching would, probably justify the adoption of either one of the alternative recommendation systems. Another aspect to keep in mind is that farmers usually apply N rates greater than 280 kg N ha⁻¹, and therefore the N fertilizer cost and the potential for N lixiviation may be greater.

Evaluating the effect of soil means to check whether the results differ when Soil Groups are considered separately. The Coefficient of Variation calculated in Table 4 gives a general idea about differences among soils. As it can be observed from the numbers, applied N

Rates did not differ much among Soil Groups for the same recommendation system, and therefore, it means that PPNT levels were fairly similar among soil groups. This could be understood by the adjusted N rates applied in the Balance and PPNT_{crit} methods (in some instances leading to yield reductions) that lead to poor soil residual N levels left in the soil by the crop. On the contrary, higher variability among Soil groups was observed for Grain Yield and N uptake, and specially for N leaching amounts. The main soil factor affecting crop response and N leaching was the effective soil depth and soil texture to a lesser extent. Data shown in Table 3.5 makes evident a sharp decrease of yield for the shallow soils (0-40 cm) as a consequence of severe crop water stress during vegetative growth. This difference was accentuated for the coarser soils, became less apparent for the moderately deep soils (0-70 cm) and almost nonexistent for the deep (0-100 cm) and very deep soils (0-130 cm). Cumulative N leaching was also highly influenced by soil depth rather than soil texture, with levels as high as 260 kg N ha⁻¹ for shallow and coarse soils. Even though shallow soils represent the most sensitive cases regarding water stress and amounts of N loss through leaching, they only represent a 14% of the studied area.

Table 3.5. Long-term Average Grain yield and N leaching amounts for the Soil Groups, sorted according their effective soil depth and with the corresponding percentage of the total covered area.

Effective depth (cm)	Grain Yield (t ha ⁻¹)	N leaching (kg N ha ⁻¹)	Covered area (%)
0-40	5.1 – 7.8	220 – 260	14
0-70	12.3 – 13.7	140 – 220	24
0-100	13.9	100 – 170	11
0-130	13.9	40 - 100	51

If the interactions between N fertilizer recommendation system and the soil group are investigated, it can be seen that effective soil depth plays a greater role than soil texture.

Figure 3.4 and 3.5 illustrates this for the soils developed on coarse calcareous deposits (B-1 to B-6-7). Yield decrease and N leaching increase with the two alternative methods were more accentuated in the shallow soils with medium to coarse textures.

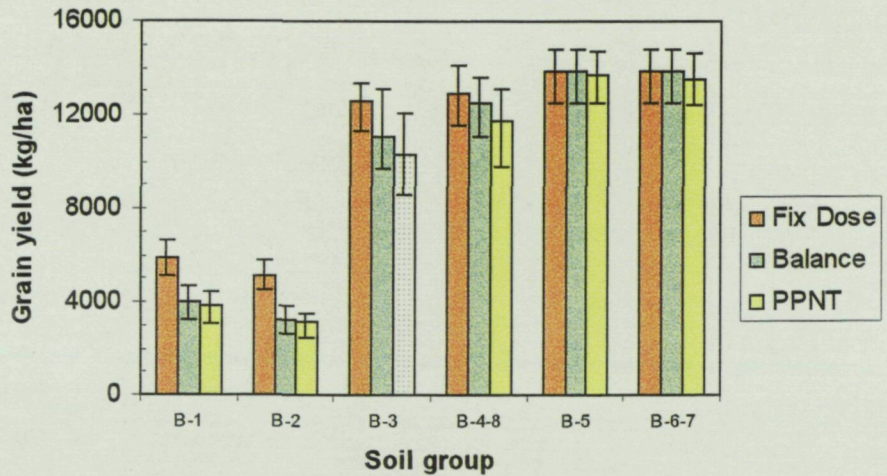


Figure 3.4. Long-term average grain yield for the soil groups developed on calcareous deposits (B-1 to B-6-7). Plotted bars represent 20 and 80-percentile values for grain yield.

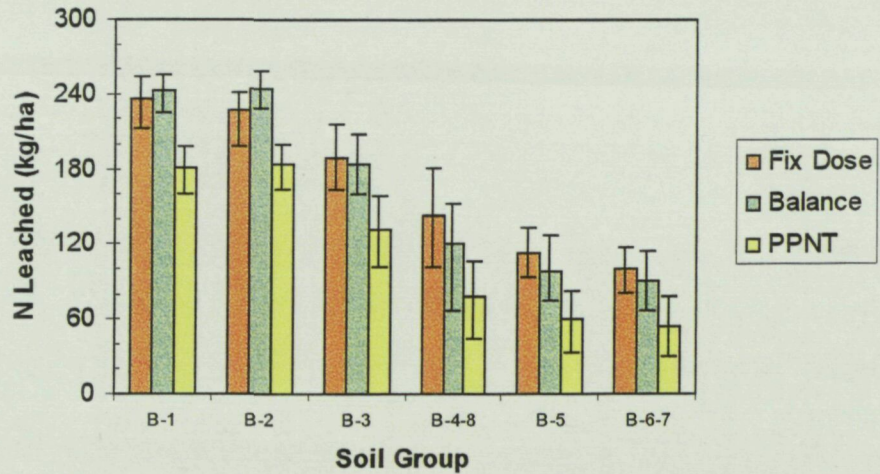


Figure 3.5. Long-term average N leaching yield for the soil groups developed on calcareous deposits (B-1 to B-6-7). Plotted bars represent 20 and 80-percentile values for N leached through the growing season.

As the soil became deeper and the texture was finer yield differences were buffered, observing no differences among N fertilizer strategies for soils deeper than 100 cm (62% of the area). However, for the shallow soils, grain yield performed similar for the two alternative strategies. N loss through leaching resulted to be more sensitive to the N fertilizer recommendation system when simulating the different soil groups. In this case, the different N rate applied according to each strategy lead to apparent differences in N leaching in all the soil groups.

The next aspect to evaluate was the effect of the N fertilizer recommendation system on crop performance and N leaching and its stability against inter-annual weather conditions variability. The 20-percentile value in Figure 3.4 and 3.5 means that 80% of the time the expected value will be equal or greater than the plotted value, while the 80-percentile value indicates that only 20% of the time the expected value will be equal or greater than the quoted value. The main factor that determined inter-annual grain yield variability was soil depth, with soil texture as a secondary aspect. Greatest instability was obtained for the moderately deep soils (0-70 cm), while water stress restrictions to growth in the shallow soils (B-1 and B-2) and higher water content storage capacity in deeper soils reduced year-to-year yield oscillations. The same pattern was observed N leaching. Here, shallow soils resulted in fairly constant high N leaching amounts regardless of weather conditions during the growing season, probably due to the N transport resulting from irrigation. In deeper soils (> 70 cm), drainage volumes were smaller and more extreme years would be needed to expect higher or lower N leaching amounts. The three N rate recommendation methods produced similar inter-annual variations on yield and N leaching, and none of the three

methods clearly provided more stability. The management conditions implemented in the simulations (fixed planting date and irrigation management, continuous corn and no organic N applications) really provided little inter-annual variability on the PPNT levels, as reflected by the fairly low variations of the applied N fertilizer rates (data not shown).

The final aspect to be considered in performing a regional analysis is the spatial distribution of the variables of interest. These kind of maps may be a helpful complementary tool for local experts to localize certain soil groups. It also may allow the establishment of future relationships between production, N fertilizer use and pollution, introducing into the analysis geo-morphological, land-use, water table and watershed aspects, non-point pollution sources (ex.: farms) and its influence on surface water streams.

As an example, a map of long-term average N leaching amounts it is shown in Figure 3.6 for the three N rate recommendation systems. As commented earlier, shallow and coarser soils are expected to be more sensitive to N loss through leaching (colored in darker gray).

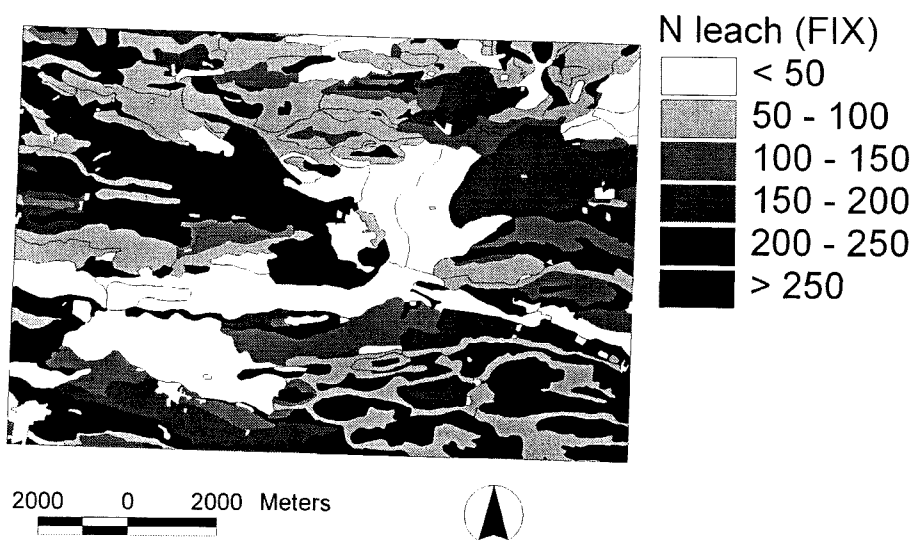


Figure 3.6a. Simulated long-term average N leaching maps for each soil group and for FIX DOSE recommendation system. Numbers in the legend are in kg NO³-N ha⁻¹.

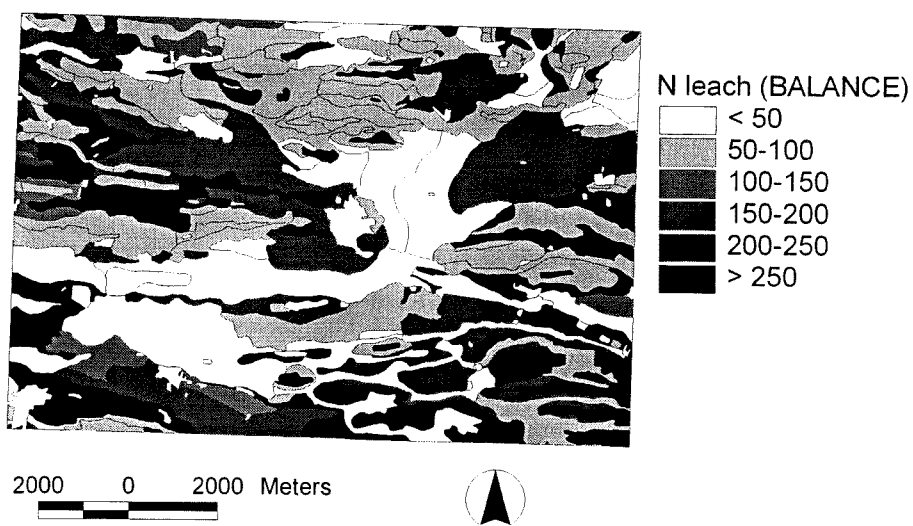


Figure 6b. Simulated long-term average N leaching maps for each soil group and for BALANCE BASED recommendation system. Numbers in the legend are in kg NO³-N ha⁻¹.

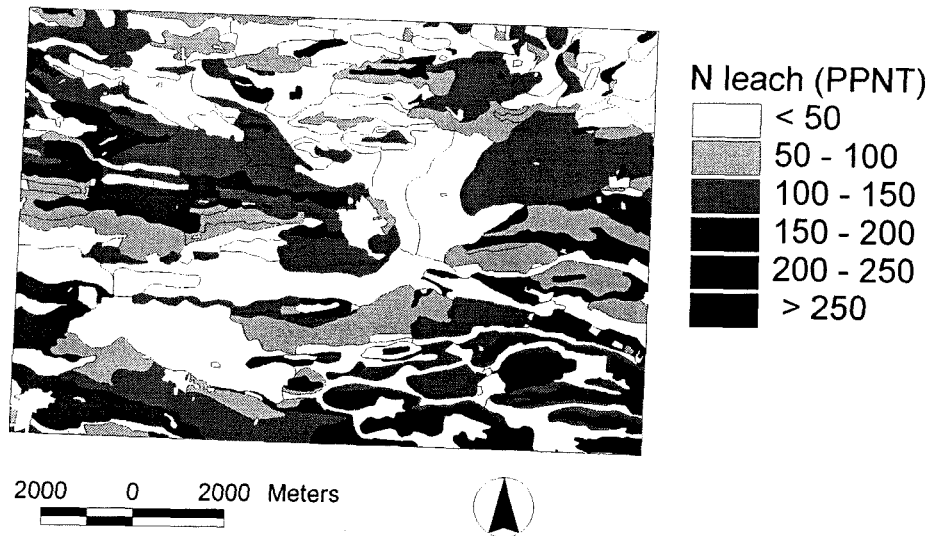


Figure 6c. Simulated long-term average N leaching maps for each soil group and for PPNT_{crit} BASED recommendation system. Numbers in the legend are in kg NO₃-N ha⁻¹.

5.4. Conclusions

Some caution should be taken when using the following conclusions for field management purposes. Note that these were results obtained from simulations that represent particular scenarios. Some variations would be expected if some conditions of the simulations were changed, such as: irrigation management, initial NO₃-N levels, planting date and time of fertilizer application, among others.

Field analysis

1. Year-to-year climatic conditions variability affected simulated crop performance and N demand, as well as soil N availability, by affecting NO₃-N redistribution within the

profile and N loss through leaching. Derived yearly variations of $PSNT_{crit}$ (0-30 cm) were more evident for the Loam than for the SCL soil.

2. The study was able to define single values of $PSNT_{crit}$ (0-30 cm) to differentiate responsive from non-responsive fields, specifying the probability of error associated to them. If a conservative attitude is taken (10% probability of error) a level of 100 kg $NO_3-N ha^{-1}$ (22 g N kg^{-1}) (0-30 cm) was obtained for both soils, while if a more risky attitude was chosen (50% probability of error) a level of 86 and 80 kg $NO_3-N ha^{-1}$ (19 and 18 g N kg^{-1}) were obtained for the Loam and SCL soils, respectively.
3. Using a unique level of $PSNT_{crit}$ to identify fields where supplementary N fertilizer applications are needed can be done by the user. The study was able to provide the probability of error associated to the decision of applying or not applying fertilizer, considering two risk attitudes (conservative and more risky) and the $PSNT$ levels measured in the field. In addition, information was provided on whether N will be applied in excess or will result in a shortage of N for the crop.

Regional analysis

4. In general, by using the two alternative N rate recommendation systems there was a sharp reduction of N loads into the area, that led to a diminution of N loss through leaching, but with negative effects on the grain yield.
5. This general pattern was somehow changed when soil groups were compared separately. N fertilizer rates applied with the two methods did not show great variability among soils. However, grain yield performance and N leaching amounts were highly correlated to soil depth, and to a less extent to soil texture. Shallow (0-40 cm) and

coarser soils showed minimum and maximum yield and N leaching, respectively. Differences among N recommendation systems were greatest for the shallow soils with coarser textures. The majority of soils are deeper than 100 cm (62% of the area) and showed much less grain yield differences among them, although N leaching was more sensitive to the N rate recommendation system.

6. Grain yield and N leaching in moderately deep soils (0-70 cm) appeared to be highly sensitive to inter-annual variability. The effect of seasonal climatic conditions variations was similar for the three N rate recommendation systems.
7. Choosing among one of the proposed N recommendation systems, based on the results from the simulations, may be subjected to changes due to PPNT procedure considerations (depth and moment of sampling) and to the parameters used in the recommendation algorithms (yield goal, N fertilizer use efficiency and $PSNT_{crit}$). In order to outline improved management practices with these simulation analyses, deeper research should be done to evaluate the effect of these changes.

6. CONCLUSIONES GENERALES

6. CONCLUSIONES GENERALES

A continuación se sintetizan las conclusiones más destacadas obtenidas en el estudio:

CAPÍTULO I

1. Los factores que resultaron más influyentes sobre la disponibilidad de N en el suelo y el comportamiento del PSNT fueron, la aplicación de fertilizante N en pre-siembra, la textura y el contenido de materia orgánica del suelo, la presencia de alfalfa como cultivo anterior y las condiciones climáticas durante el periodo de crecimiento del cultivo.
2. El mayor potencial para el lavado de N por debajo de la profundidad radicular se produjo durante el periodo inicial de crecimiento del cultivo.
3. Hay un potencial para reducciones de la dosis N aplicada sin detrimentos sobre el rendimiento, permitiendo un mejor uso del N por parte del cultivo y reduciendo los niveles residuales de N-NO₃ en el suelo. Niveles de N disponible en el suelo (N-NO₃ pre-cobertera, zona radicular + N fertilizante cobertera) superiores a 300 kg N ha⁻¹ no supusieron incrementos apreciables de rendimiento.
4. El contenido de N-NO₃ en pre-cobertera se puede utilizar para diferenciar parcelas con y sin respuesta a la fertilización N. Se identificó un intervalo para el nivel de PSNT crítico (0-30 cm) de 70 a 100 kg N-NO₃ ha⁻¹ (15 a 22 g N kg⁻¹).

CAPÍTULO II

5. A nivel general, el modelo de simulación CropSyst fue capaz de predecir de forma razonablemente correcta rendimiento, biomasa y N absorbido en madurez fisiológica, y

de simular la demanda de N por el cultivo y la respuesta del crecimiento al N absorbido.

6. El modelo necesita una mayor profundización en aspectos relacionados con la simulación de los efectos del N en el índice de cosecha y referentes al movimiento de agua y N en el suelo cuando hay flujo preferencial, elementos gruesos y capa freática.
7. Otras divergencias observadas entre el modelo y los datos experimentales se atribuyeron a la estimación de ciertos parámetros de cultivo y a la difícil estimación de ciertos datos necesarios (perfiles iniciales del contenido de N-NO₃ del suelo, y N aplicado con el agua de riego).

CAPÍTULO III

8. El modelo simuló variaciones anuales en el PSNT_{crit} y diferenció entre los dos tipos de suelos simulados (L: franco y SCL: franco-arcillo-limoso).
9. El estudio permitió identificar valores únicos de PSNT_{crit} para diferenciar parcelas con necesidades de fertilizante N. Las simulaciones realizadas con el modelo CropSyst permitieron diferenciar entre dos tipos de suelo y asociar una probabilidad de error a la decisión de aplicar o no aplicar fertilizante considerando dos actitudes de riesgo.
10. En el análisis a nivel regional, los dos métodos alternativos de recomendación de la dosis N, resultaron en una disminución importante de las cantidades de fertilizante N aplicadas en comparación a la práctica general de la zona. Sin embargo, ésta disminución trajo como consecuencia una reducción general de los rendimientos y de las cantidades de N lixiviadas.
12. La profundidad efectiva del suelo y en menor importancia la textura del suelo fue los factores más determinantes a la hora de explicar la variabilidad entre los grupos de suelos definidos. Contrariamente, para los tres sistemas de recomendación evaluados,

los efectos de la variabilidad inter-anual sobre la cantidad de N aplicada, el rendimiento, y el N lixiviado fueron mucho menores.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- Addiscott, T.M., Whitmore, A.P., Powlson, D.S. 1991. *Farming, Fertilizers and the nitrate problem*. C.A.B. International. 170 pp.
- Addiscott, T., Smith, J., Bradbury, N. 1995. Critical evaluation of models and their parameters. *J. Environ. Qual.* 24: 803-807.
- Badini, O., Stockle C.O., Franz, E.H. 1997. Application of crop simulation modeling and GIS to agroclimatic assessment in Burkina Faso. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 64: 233-244.
- Ballesta, A., Lloveras, J. 1996. Effects of nitrogen fertilization on aize production and on soil nitrate accumulation in the irrigated areas of Ebro Valley (Spain). 4th Congress ESA, Veldhoven, Book of abstracts: 328-329.
- Binford, G.D., Blackmer, A.M., Cerrato, M.E. 1992. Relationships between corn yields and soil nitrate in late spring. *Agron. J.* 84: 53-59.
- Brown, H.M., Hoefft, R.G., Nafziger, E.D. 1991. Evaluation of soil profile NO₃-N for prediction of N fertilizer requirements. 1991 North Central Extension Industry Soil Fertility Conf., 13-14 Nov. 1991. St. Louis, Missouri: 54-61.
- Caballero, R., Roman, R., Bustos, A., Díez, J.A., Caballero, A. 1996. Effects of irrigation practices and fertilizer type on nitrate leaching and maize productivity under field conditions. ESRA '96. L'Eau Souterraine en region Agricole. Poitiers 9-12 Sept. 1996: S4 13-16.
- Campbell, G.S. 1985. *Soil physics with Basic. Transport models for soil-plant systems*. Developments in soil science No. 14. Elsevier, New York.
- 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.
- Cerrato, M.E., Blackmer, A.M. 1990. Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer. *Agronomy Journal*, 82: 138-143.
- CLRSWC (Committee on Long-Range Soil and Water Conservation. Board of Agriculture. National Research Council). 1993. *Soil and Water Agriculture: An Agenda for Agriculture*. Academy Press.
- Corwin, D.L., Loague, K., Ellsworth, R. 1998. GIS-based modeling of non-point source pollutants in the vadose zone. *Journal of Soil and Water Conservation* 53 (1): 34-38.

- DOGC. 1998a. Decret 283/1998, de 21 d'octubre, de designació de les zones vulnerables en relació amb la contaminació de nitrats procedents de fonts agràries. Diari oficial de la Generalitat de Catalunya, 2760-6-11-1998: 13678-13680.
- DOGC. 1998b. Ordre, de 22 d'octubre de 1998, del Codi de bones pràctiques agràries en relació amb el nitrogen. Diari Oficial de la Generalitat de Catalunya, 2761-9-11-1998: 13751-13756.
- 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.
- Dou, Z., Fox, R.H., Toth, J.D. 1995. Seasonal Soil Nitrate Dynamics in Corn as affected by tillage and nitrogen source. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 858-864.
- Durieux, R.P., Brown, H.J., Stewart, E.J., Zhao, J.Q., Jokela, W.E., Magdoff, F.R. 1995. Implications of nitrogen management strategies for nitrate leaching potential: roles of nitrogen source and fertilizer recommendation system. *Agron. J.* 87: 884-887.
- Ehrhardt P.D., Bundy, L.G. 1991. Predicting subsoil nitrate content from surface measurements. 1991 North Central Extension Industry Soil Fertility Conf., 13-14 Nov. 1991. St. Louis, Missouri: 114-123.
- Ferrer, F., Villar, J.M., Villar, P., Aran, M., Stockle, C.O. 1997a. Impacto del nitrogeno 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.
- 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: 277-284.
- Fox, R.H., Roth, G.W., Iversen, K.V., Piekielek, W.P. 1989. Soil and tissue nitrate tests compared for predicting soil nitrogen availability to corn. *Agron. J.* 81: 971-974.
- Fox, R.H., Meisinger, J.J., Sims, J.T., Piekielek, W.P. 1992. Predicting N fertilizer needs for corn in humid regions: Advances in mid-Atlantic states. Pages 43-56 in B.R. Bock and K.R. Kelley, eds. Predicting N fertilizer needs for corn in humid regions. Bull. Y-226. National Fertilizer and Environmental Research Center, Tennessee Valley Authority, Muscle Shoals, AL.
- Greenwood, D.J., Draycott, A. 1988. Recovery of fertilizer-N by diverse vegetable crops: processes and models. In: Nitrogen efficiency in agricultural soils. D.S. Jekson and K.A. Smith (Ed.): 46-61.
- Hanway, J.J. 1966. Growth stages of corn (*Zea mays* L.). *Agron. J.* 55: 487-492.

- Harrison, S.R. 1990. Regression of a model on real-system output: an invalid test of model validity. *Agricultural Systems*: 183-190.
- Hergert, G.W. 1987b. Status of residual nitrate-nitrogen soil tests in the United States of America. In: *Soil testing: Sampling, Correlation, Calibration, and Interpretation*. J.R. Brown (Editor). SSSA Special Publication no.21. pp: 73-88.
- Herrero, C., Boixadera, J., Danés, R., Villar, J.M. 1993. Mapa de sòls de Catalunya 1:25.000. Full núm.: 360-1-2 (65-28) Bellví. 198 pp.
- Jokela, W.E., Randall, G.W. 1989. Corn yield and residual soil nitrate as affected by time and rate of nitrogen application. *Agron. J.* 81: 720-726.
- Karlen, D.L., Flannery, R.L., Sadler, E.J. 1988. Aerial accumulation and partitioning of nutrients by corn. *Agron J.* 80: 232-242.
- Klausner, S.D., Reid, W.S., Bouldin, D.R. 1993. Relationship between late spring soil nitrate concentrations and corn yields in New York. *J. Prod. Agric.* Vol. 6, no.3: 350-354.
- Lal, H., Hoogenboom, G., Calixte, J.P., Jones, J.W., Beinroth, F.H. 1993. Using crop simulation models and GIS for regional productivity analysis. *Transactions of the ASAE*. Vol. 36(1): 175-184. American Society of Agricultural Engineers.
- Loague, K., Green, R.E. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. *J. Contam. Hydrol.*, 7: 51-73.
- Lory, J.A., Rosselle, M.P., Peterson, T.A. 1995. A comparison of two nitrogen credit methods: traditional vs. Difference. *Agron. J.* 87: 648-651.
- Magdoff, F. 1991a. Understanding the Magdoff Pre-Sidedress Nitrate Test for Corn. *Journal of Production Agriculture*. 4: 297-305.
- Magdoff, F. 1991b. Field nitrogen dynamics: implications for assessing N availability. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 22 (15&16): 1507-1517.
- Magdoff, F., Ross, D., Amadon, J. 1984. A soil test for nitrogen availability to corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 1301-1304.
- Meisinger, J.J. 1984. Evaluating plant-available nitrogen in soil-crop systems. In: *Nitrogen in Crop Production*, R.D. Hauck (Editor): 391-416. Am. Soc. Agronomy, Madison.
- Neeteson, J.J. 1995. Nitrogen management for intensively grown arable crops and field vegetables. In: *Nitrogen fertilization in the environment*, P.E. Bacon (Editor): 295-325.
- Neeteson, J.J., Dilz, K., Wijnen, G. 1989. In: *Management Systems to reduce impact of nitrates*. J.C. Germon (Editor). Commission of the European Community. Elsevier Applied Science: 253-263.

- 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.
- Plénet, D. 1995. Fonctionnement des cultures de maïs sous contrainte azotée. Détermination et application d'un indice de nutrition. Doctoral Thesis, Académie de Nancy-Metz, Institut National Polytechnique e Lorraine, France, 247 pp.
- Power, J.F., Broadbent, F.E. 1989. Proper accounting for N in cropping systems. In: *Nitrogen management and groundwater protection*, R.F. Follet (Editor). pp: 159-181.
- Ramos, C. 1996a. Impacto del Riego en la Contaminación y Calidad de las Aguas Subterráneas. *Riegos y Drenajes XXI*, 92, January 1996, pp: 39-44.
- *Rhoads, F.M., Bennett. 1990. Corn. In: *Irrigation of agricultural crops*. Agronomy mb. 30. ASA. CSSA. SSSA. Madison, Wisconsin, USA.
- Roman, R., Caballero, R., Bustos, A., Díez, J.A., Cartagena, M.C., Vallejo, A., Caballero, A. 1996. Water and solute movement under conventional corn in central Spain: II Salt Leaching. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 1536-1540.
- Schmitt, M.A., Randall, G.W. 1994. Developing a soil nitrogen test for improved recommendations for corn. *J. Prod. Agric.* Vol. 3, no. 3: 328-334.
- Sexton, B.T., Moncrief, J.F., Rosen, C.J., Gupta, S.C., Cheng. 1996. Optimizing nitrogen and irrigation inputs for corn based on nitrate leaching and yield on a coarse-textured soil. *J. Environ. Qual.* 25: 982-992.
- Sims, J.T., Vasilas, B.L., Gartley, K.L., Milliken, B., Green, V. 1995. Evaluation of soil and plant nitrogen tests for maize on manured soils of the atlantic coastal plain. *Agron. J.* 87: 213-222.
- Soil Survey Staff. 1992. *Keys to soil taxonomy*. 6th edition. USDA. 306 pp.
- 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. 1996. GIS and simulation technologies for assessing cropping systems management in dry environments. *American Journal of Alternative Agriculture* Vol. 11, No. 2 and 3: 115-120.
- Stockle, C.O., Debaeke, P. 1997. Modeling crop nitrogen requirements: a critical analysis. *European Journal of Agronomy* 7: 161-169.
- 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., 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.
- Villar, P., Villar, J.M., Stockle, C., Ferrer, F., Aran, M. In press. A survey of soil and water nitrate content of commercial cornfields on irrigated soils.
- Vitosh, M.L., Warncke, D.D., Christenson, D.R., Dahl, J.G. 1988. 18th North Central Extension-Industry Soil Fertility Workshop, November 9-10, 1988. St. Louis, Mo.
- Wehrmann, J., Scharpf, H.C., Kuhlmann, H. 1988 In: Nitrogen efficiency in agricultural soils. D.S. Jenkinson and K.A. Smith (Ed.): 38-45.
- 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.
- Zebarth, B.J., Paul, J.W. 1997. Growing season nitrogen dynamics in manured soils in south coastal British Columbia: Implications for a soil nitrate test for silage corn. *Canadian Journal* 77 (1): 67-76.
- Zhang, W.L., Tian, Z.X., Zhang, N., Li, X.Q. 1996. Nitrate pollution of groundwater in northern China. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 59: 223-231.

8. ANEJOS

ANEJO I. Índices estadísticos utilizados en la evaluación del modelo.

ANEJO 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 i O_{ij} es la medida i del tratamiento j . \bar{O}_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, $\hat{S}_j = a + b O_j$

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

Índices estadísticos propuestos por Loague and Green (1991)

- Eficiencia del modelo (EF)

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

**ANEJO II. Prácticas usuales de la fertilización nitrogenada en
la zona.**

ANEJO II

PRÁCTICAS USUALES DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN LA ZONA

Metodología

Se realizó una encuesta telefónica durante los meses de Febrero-Marzo de 1997 a doce técnicos de Áreas de defensa Vegetal (ADV) o de cooperativas con actividad en la Zona regable de los Canales de Urgell. La cuestión que se les preguntó fue: ¿Cuál es la fertilización usual de los agricultores en maíz?. Especificar también que las prácticas que se reportan aquí no son absolutas, y que hay una gran variabilidad entre agricultores.

Resultados

Fertilización de pre-siembra

- Se aplica entre mediados de Febrero a finales de Abril. Las fechas típicas de siembra son entre mediados y finales de Abril.
- Los fertilizantes más utilizados por orden de preferencia son “blendings” del tipo:
 - 15-15-15
 - 15-10-20
 - 12-12-24, 10-12-15, 15-10-15
 - Sulfato amónico (21%)
- Lo más normal es aplicar un “blending” como el 15-15-15 en pre-siembra más una aplicación en cobertera antes del primer riego. Hay otras prácticas más minoritarias que aplican la totalidad del fertilizante N en pre-siembra en diferentes formas:
 1. Aplicación de la totalidad del fertilizante N en pre-siembra en forma de Urea.
 2. Aplicación de la totalidad del fertilizante N en pre-siembra mezclando un “blending” tipo 15-15-15 o similar con Urea.
 3. Aplicación de un “blending” o fertilizante compuesto con inhibidor de la nitrificación.

Fertilización de cobertera

- Los fertilizantes más utilizados son::
 - Nitrato amónico, NA (33.5%)
 - Nitrato Amónico Cálcico, NAC (26%)
 - Solución Nitrogenada, N₃₂ (32%)
 - Nitrosulfato Amónico (26%)
- Lo más normal es realizar la aplicación de cobertera en forma de NA o NAC. Otra opción bastante extendida es la aplicación del fertilizante en forma de solución N-32 en los primeros riegos (de mediados de Junio a principios de Julio). Este último caso es muy común cuando el agricultor no ha tenido suficiente tiempo para aplicar fertilizante en forma de NA o NAC.
- Se aplica normalmente antes del primer riego (finales de Mayo a principios de Junio), cuando el maíz está en el estadio de 5-6 hojas (30-50 cm).

La Tabla 1 y Tabla 2 muestran el tipo de fertilizante y las dosis aplicadas según la localidad.

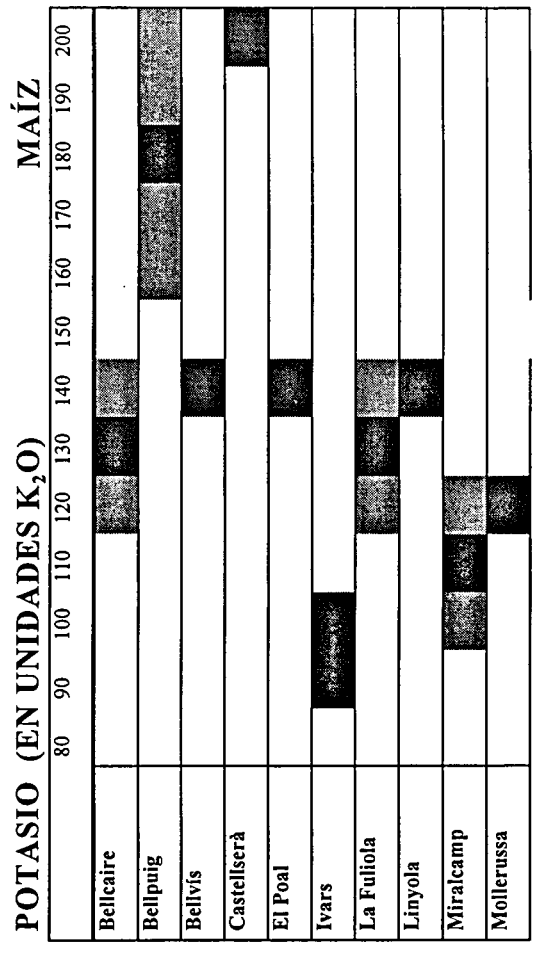
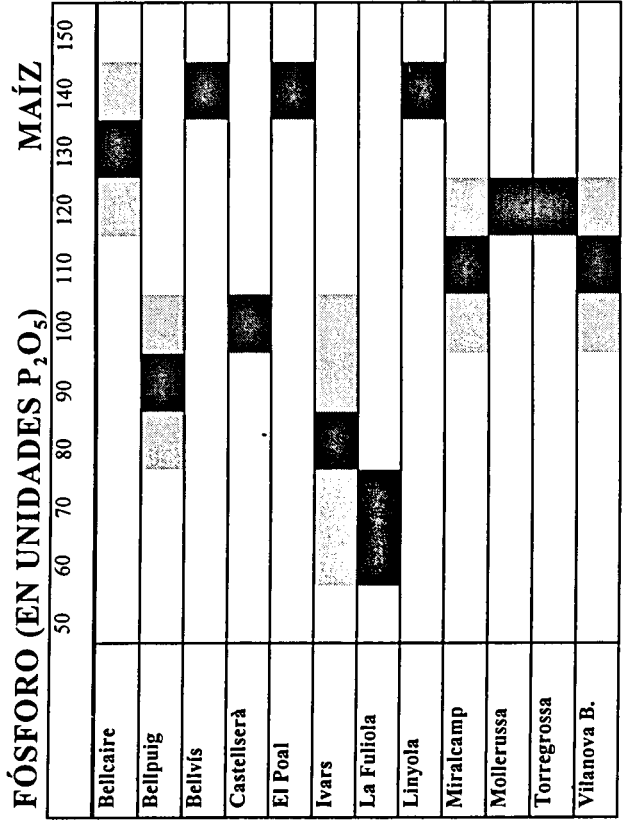
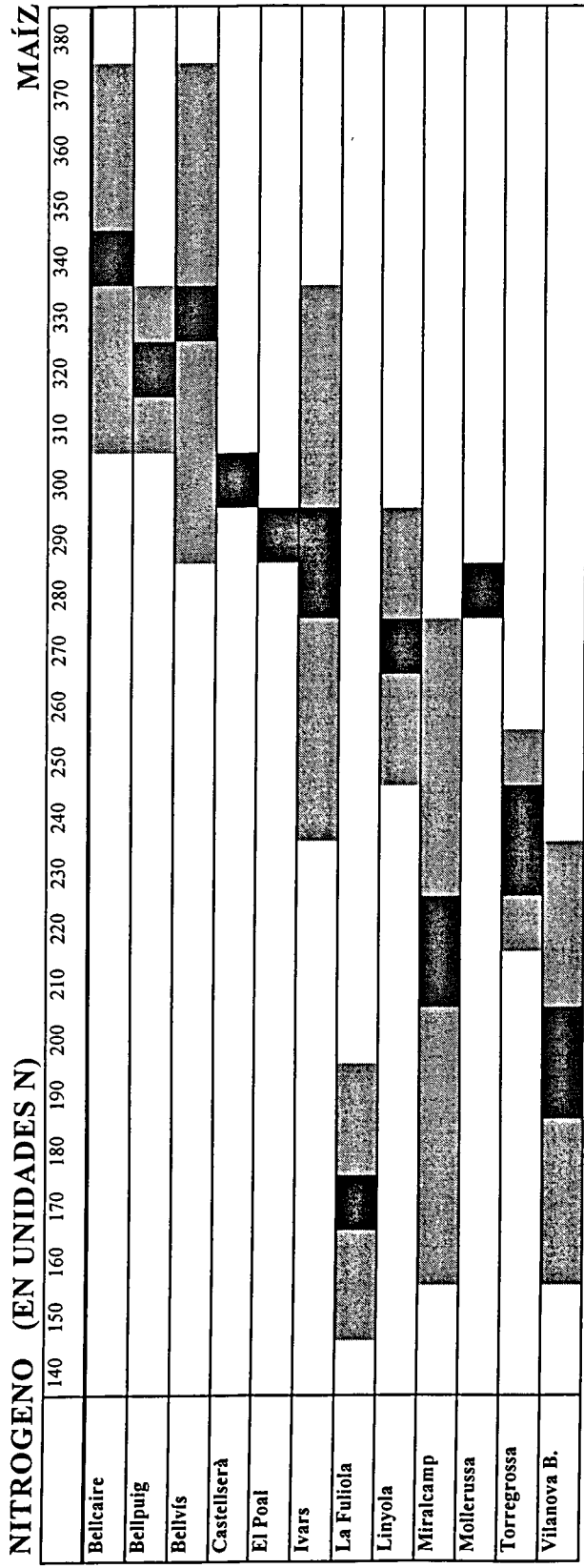
Tabla 1. Dosis y fertilizantes más utilizados en la zona regable de los Canales de Urgell para maíz.

Localidad	Pre-siembra	Cobertera
Belcaire	350 - 400 kg/j (15-15-15)	250 - 300 kg/j NA o N ₃₂ (2-3 riegos)
Bellpuig	300 -350 kg/j (12-12-24)	300 kg/j N ₃₂ (3 riegos)
Bellvis	400 kg/j (15-15-15)	200-300 kg/j NA o N ₃₂ (2-3 riegos)
Castellserà	430 kg/j (15-10-20)	200 kg/j N ₃₂ (2 riegos)
El Poal	400 kg/j (15-15-15)	200 kg/j NA o N ₃₂ (2-3 riegos)
Ivars d'Urgell	250 - 300 kg/j (15-15-15 ò 15-10-15)	250 - 300 kg/j NAC o NA
La Fuliola	250 - 300 kg/j (15-10-20)	100 - 120 kg/j NAC, NA o N ₃₂
Linyola	400 - 420 kg/j (15-15-15)	150-200 kg/j N ₃₂ (1-2 riegos)
Miralcamp	300-350 kg/j (15-15-15)	100-150 kg/j NAC, NA o N ₃₂
Mollerussa	350 kg/j (15-15-15) + 150 kg/j urea	-
Torregrossa	430 kg/j (10-12-15)	200 kg/j NAC o NA
Vilanova de B.	300 -350 kg/j (15-15-15)	100-150 kg/j NAC, NA o N ₃₂

* Multiplicar las dosis por 2.3 para pasar de kg jornal⁻¹ a kg ha⁻¹.

Tabla 2. Dosis más usuales (en unidades NPK) en la zona regable de los Canales de Urgell para maíz.

	FONS			COBERT.		TOTAL	
	UN	UP ₂ O ₅	UK ₂ O	UN	UN	UP ₂ O ₅	UK ₂ O
Belcaire	120-140	120-140	120-140	190-230	310-370	120-140	120-140
Bellpuig	80-100	80-100	160-200	230	310-330	80-100	160-200
Bellvís	140	140	140	150-230	290-370	140	140
Castellserà	150	100	200	150	300	100	200
El Poal	140	140	140	150	290	140	140
Ivars d'Urg.	90-100	60-100	90-100	150-230	240-330	60-100	90-100
La Fuliola	90-100	60-70	120-140	60-90	150-190	60-70	120-140
Linyola	140	140	140	110-150	250-290	140	140
Miralcamp	100-120	100-120	100-120	60-110	160-270	100-120	100-120
Mollerussa	120+160	120	120	-	280	120	120
Torregrossa	100	120	150	120-150	220-250	120	150
Vilanova B.	100-120	100-120	100-120	60-110	160-230	100-120	100-120



ANEJO III. Analyzing environmental side effects derived from applying recommended N fertilizer rates based on the N-min method with a cropping systems simulation model.

ANEJO III**ANALYZING ENVIRONMENTAL SIDE EFFECTS DERIVED FROM APPLYING RECOMMENDED N FERTILIZER RATES BASED ON THE N_{min} METHOD WITH A CROPPING SYSTEMS SIMULATION MODEL.**

El presente artículo se presentó como póster en el 11th CIEC World Fertilizer Congress, Gent 7-15 Septiembre 1997.

1. Abstract

In the irrigated area of the Urgell's Channels (NE of Spain) N fertilization rate field experiments with corn were carried out, in order to determine optimum N fertilizer rates through the N-min method. In this study, CropSyst model was used to simulate crop response curves to N rate, for various N-min levels at preplanting and two contrasted soils. Functions relating the Economical Optimum Rate with the N-min level at preplanting were derived for the two soils, with resulting higher optimum rates for the Sandy Loam soil. Finally, long term simulations, applying the relationship previously obtained, showed that N leaching was only important for the Sandy Loam soil, with high leaching peaks when yield failure occurred.

2. Introduction

In the irrigated area of the Urgell's Channels (Catalonia, NE of Spain, 100 km inland from the mediterranean coast) corn is the main crop, generally grown in rotation with alfalfa and wheat. Actual N Fertilizer application rates are fixed, based on each farmer's experience and usually exceeding crop N needs. Average yields in the area are around 11 t ha⁻¹ and common N fertilizer rates are about 300 kg ha⁻¹, with 40% of it applied at preplanting and the remaining applied at *knee stage*. High levels of NO₃ are found in the water table (up to 250 ppm NO₃) associated with the first irrigation event after the fertilizer is applied (Ferrer et al, 1997).

Since 1993, N fertilization rate field experiments with corn are carried out in the area in order to determine optimum N fertilizer rates through the N-min method. This method is based on the determination of the soil N-NO₃ content at preplanting, as an estimation of the N supplied by the soil. This study aims at improving N fertilizer practices by determining optimum N fertilizer rates, based on productivity and economical criteria as well as considering derived environmental side effects (loss of N through leaching). Reducing N fertilizer rates to optimum levels will help protecting the environment (less N leaching), reduce fertilizer application costs and save energy due to a reduction on the use of fertilizers.

Preliminary results (Villar et al, 1996) showed that for plant available N levels (N soil at preplanting, 0-120 cm + N fertilizer) beyond 250 kg ha⁻¹ crop N uptake and grain N content increased, while no important increases of yield were observed. In addition, high variability in the crop response to N-min levels and N rate was detected depending on the previous crop, application of manure, soil organic content and soil texture.

From the N fertilization rate experiments, empirical equations are obtained to relate the N-min levels found at preplanting (0-90 cm) with the Economical Optimum N Fertilizer Rate (EOR). The recommended N fertilizer rates obtained with the N-min method are

applicable to average conditions, and its use on a field basis will be more or less adjusted depending on the specific set of factors found at the field, that affect soil N availability and plant response (Neeteson, 1995). Another inconvenient with the general use of the N-min method is that it doesn't give information about the amount of N lost, through leaching, derived from applying the recommended N fertilizer rates (Neeteson, 1995). In this context, simulation models can be a very helpful tool (Neeteson, 1993). They can be used to assess N losses through leaching in different scenarios (soil type, type of year and crop, and management practices), and thus, to examine and readjust the empirical equations obtained with the N-min method.

CropSyst model (Stockle and Nelson, 1996) is a comprehensive crop growth/management model that has already been calibrated and validated using the large data base existing in the area (Villar et al, 1996). Its ability to simulate N dynamics in the soil-plant system and the crop response has been tested, as well, for some other conditions (Stockle et al, 1994; Pala et al, 1996).

The present study used CropSyst to simulate N fertilization rate experiments with corn to obtain crop response curves for different N-min levels at preplanting. Afterwards, a function was constructed relating the N-min level with the EOR. Finally, fifteen consecutive years were simulated, and at preplanting of each year, N fertilizer rates were applied according to the Nmin – EOR relationship derived previously. Each year before planting, the amount of residual N in the soil, and the accumulated leached N, mineralized N and crop N uptake of the previous season were analyzed. This analysis was done comparing two contrasted soils in the area of study, a Silty Clay Loam soil (SCL) that covers about a 60% of the area, and a Sandy Loam (SL) soil that represents only a 10% of the area but it is the most susceptible to N leaching.

These simulations helped developing the methodology to obtain N fertilizer rate recommendations based on the N-min method and to perform an analysis of the amount of N leached from the system derived from applying the recommended rates.

3. Materials and methods

3.1. Simulation and adjustment of crop response curves and determination of the Nmin – EOR function

Systematic monitoring of N fertilization experimental fields in the area of study has yielded extensive data, for different crop seasons and soil, on grain yields, soil water content and N-NO₃ content profiles, biomass accumulation, crop N uptake evolution and phenological studies. CropSyst crop parameters (Table 1) were either measured or estimated from the field data, taken from the CropSyst Manual or by indirect fitting. Soil input files were implemented for the two soils considered in the study (Table 2). The simulation was implemented so that no N volatilization and N denitrification were simulated.

Table 1. Some crop input parameters used in the simulations

Crop parameter	Corn
Unstressed harvest index	0.50
LAI maximum	6.0
Base Temperature (C)	8
Extinction coefficient	0.45
Light/biomass conversion (g MJ ⁻¹)	4
Max. Plant water uptake (mm day ⁻¹)	12
Xylem critical water potential (J kg ⁻¹)	-1200
Xylem wilting water potential (J kg ⁻¹)	-1800
Biomass/transp. coeff. (kPa kg m ⁻³)	7.6
ET crop Coeff.	1.15
Max. N conc. during early growth (%)	3.2
Max. N conc. at maturity (%)	11
Residual N per soil layer (kg ha ⁻¹)	2

Table 2. Characteristics of the SCL and the SL soils considered

Average values (0-1 m)	Silty Clay Loam	Sandy Loam
Depth (m)	1	1
Bulk density (kg m ⁻³)	1400	1500
P. Wilting Point (m ³ m ⁻³)	0.15	0.11
Field Capacity (m ³ m ⁻³)	0.33	0.19
Sand (%)	15	50
Silt (%)	52	30
Clay (%)	34	20
Organic M. content (%) top 0-30 cm	2.4	2.4

Real weather data from an automatic station located in the area (Palau d'Anglesola) was used to simulate two corn seasons (1993 and 1996), combining six N-min levels at preplanting, 0-90 cm, (0, 10, 30, 60, 90 and 130 kg ha⁻¹) with sixteen N fertilizer rates (0 to 240 kg ha⁻¹) applied at once at preplanting as Urea. A typical irrigation management was set for the two simulated years, with seven irrigation events, 100 mm per event, starting on the 1 June and ending on 20 August. The seeding date was fixed on April 22, considered within the most common seeding dates in the area.

A quadratic response curve was then adjusted to the yield response data by using a spreadsheet. For each of the N-min levels considered, a response curve was obtained and an Economical Optimum N Fertilizer Rate was calculated as described by Black (1985). Unit price of corn was set to the 1996 campaign price (29 PTA kg⁻¹) and the fertilizer price was set at the average 1996 Urea price (39 PTA kg⁻¹). Finally, the equation relating the N-min level with the Economical Optimum Rate was obtained as described by Neeteson (1995).

3.2. Analysis of long term simulations

Weather data from the same area was used to obtain the parameters needed by the Climgen weather generator (Ndlovu, 1994). This was used to generate fifteen years of daily temperature, solar radiation and humidity. The same soil and location files that were used in the previous simulations to obtain the crop response curves were used for this long term simulations. Each year, planting date was set to April 22, and the irrigation events were applied at 34, 46, 59, 72, 84, 98 and 108 days after plant emergence (7 events), resembling a typical irrigation scheduling. Simulation started on April 19 and ended on April 15 of the coming year.

At the beginning of each season (seeding date) the N-NO₃ soil profile was initialize with the N-NO₃ soil profile obtained at end of previous simulation. The N fertilizer rate implemented into the management file was derived the Nmin - EOR function previously obtained. No sidedressing fertilizer applications were considered.

4. Results and discussion

4.1. Simulation of Crop response to N fertilizer application rates and Economical Optimum Fertilizer rate function.

Figures 1a and 1b show the grain yield response to N fertilizer application rates for the 1996 simulation and two extreme N-min soil levels (0 and 130 kg ha⁻¹ N-NO₃ at preplanting), as well as the adjusted quadratic response curves for each case. Maximum simulated grain yields were similar for the two soils (about 13.2 t ha⁻¹ in 1996 and 12 t ha⁻¹ in 1993) and agree with the expected yields in the area. The graphs also show a higher crop response to N fertilizer rate for the Sandy Loam (SL) soil than for the Silty Clay Loam (SCL) soil. This may be explained by the fact that N loss from the system was generally higher in the SL soil (Figure 3). Important variations in the resulting EOR calculated from the simulated crop response curves were observed as the number of N fertilizer rates to construct the curves was changed. This agrees with other authors (National Research Council, 1993) that report changes in the final recommended EOR as the response model and the number of N rates used are changed.

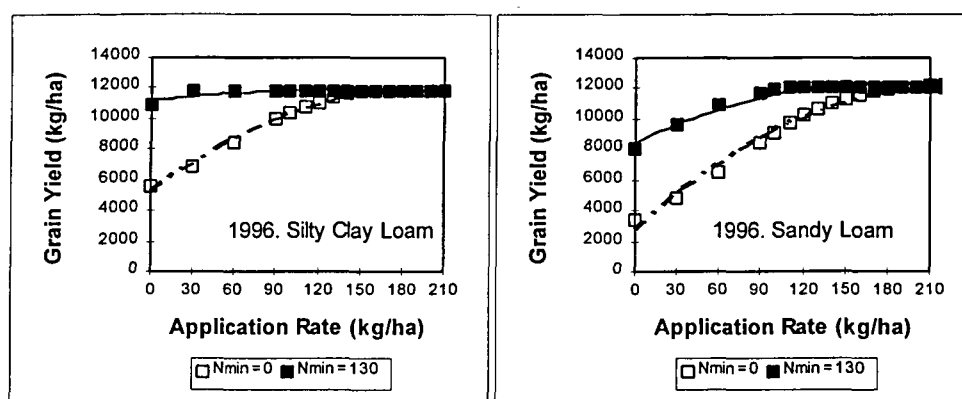


Figure 1a and 1b. Simulated crop response curves to N Fertilizer Application Rates for the two extreme N-min levels and the two types of soil.

Figure 2 illustrates the relationship between the N-min levels and the EOR obtained from the simulated response curves.

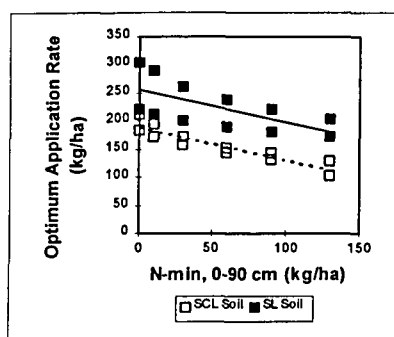


Figure 2. Relationship between the N-min level (kg ha⁻¹, 0-90 cm) and the Economical Optimum Application Rate of N Fertilizer for the two types of soil.

Sandy Loam

$$\text{EOR} = 254 - 0.56 * \text{N-min} \quad R^2 = 0.42$$

Silty Clay Loam

$$\text{EOR} = 190 - 0.59 * \text{N-min} \quad R^2 = 0.85$$

The linear equations fitted to the simulated data showed that for the interval of N-min levels considered (0 to 130 kg ha⁻¹), optimum rates varied from 254 to 181 UN for the SL soil and from 190 to 113 UN for the SCL soil. The EOR for the SL soil were higher due to a more important N loss from the system during the growing season, as commented earlier. The slopes of the equations were very similar for the two soils, and the effect of the soil N-NO₃ present at preplanting was reduced close to a 60%, therefore, making EOR computations less sensitive to the N-min levels.

4.2. Long term simulations

Table 3 illustrates intervals and average values of some output variables for the fifteen simulated years, using the Optimum N Fertilizer Application Rates derived from the Nmin - EOR equations.

Table 3. Intervals and average values of some simulated variables (average values are in parentheses).

	Silty Clay Loam	Sandy Loam
Grain Yield (t ha ⁻¹)	9.9 - 13.5 (12.1)	4.7 - 13.6 (11.4)
Optimum N Fertilizer Rate (kg ha ⁻¹)	135 - 155 (150)	200 - 235 (225)
Crop N Uptake (kg ha ⁻¹)	233 - 266 (264)	77 - 279 (240)
Acc. Leached N (kg ha ⁻¹)		
Planting to Harvest	5 - 16 (10)	32 - 235 (88)
Harvest to Preplanting	0 - 6 (3)	1 - 20 (9)
Acc. mineralized N (kg ha ⁻¹)		
Planting to Harvest	105 - 116 (111)	65 - 75 (69)
Harvest to Preplanting	63 - 86 (74)	40 - 59 (49)
Soil N-NO ₃ content, 0-90 cm (kg ha ⁻¹)		
Harvest	57 - 94 (68)	15 - 63 (28)
Residual (Preplanting)	67 - 74 (70)	51 - 96 (59)

From Table 3 it can be seen that there were no important differences of simulated grain yields between the two soils, and that they were quite similar throughout the fifteen simulated years, except for two seasons that had significant lower yields. This can be explained by a late plant emergence in that season that skipped the first irrigation event, deriving to crop water stress during vegetative growth. Eventually, this pattern was transferred to the crop N uptake (Figure 3).

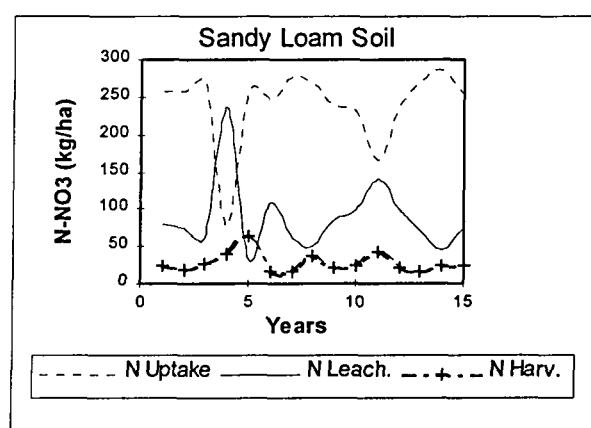


Figure 3. Simulated values of accumulated crop N uptake, N leaching and soil N-NO₃ content (0-90 cm) at harvest from the Sandy Loam soil.

For the SCL soil, N leaching during the growth period was very low throughout the fifteen years (Table 3) as compared to the SL soil. In the case of the SL soil, N leaching levels achieved peak values coinciding with a fail of crop N uptake, and therefore more N available in the soil was susceptible to leaching. This resulted in larger soil N-NO₃ contents at harvest in both cases. In the fallow period, N leaching amounts were kept below 30 kg ha⁻¹ for both soils (Table 3). This may be caused by smaller drainage volume and less N present in the soil system (no N fertilizer applications and less N from mineralization) during this period.

Recommended optimum N fertilizer rates hardly fluctuated during the simulated seasons, due to the reduced sensitivity of the N_{min} - EOR equation and to the small variation of the soil N-NO₃ content at preplanting. The regularity of the N apported by mineralization may contribute to yield similar soil N-NO₃ profiles at preplanting.

Simulated higher contents at harvest and preplanting for the SCL soil might be caused by less N leaching but also due to higher mineralization rates.

In a real situation, soil N-NO₃ content at preplanting for a given field may show greater variations than the simulated, due to differences in the previous crop, manure applications, N fertilizer application rates and fractioning, organic matter levels and low crop performance due to plant water stress during the growth period (caused by irregular irrigation). All these factors were not implemented in the simulations.

5. Conclusions

It can be seen that CropSyst can be useful in performing a sensitivity analysis of crop response to N Fertilizer Rates, N-min levels and the number of data plots needed to adjust a response curve. The N_{min} - EOR equations derived from simulated crop response curves reflected the effect of soil type, showing that in the SL soils a higher rate is required for optimum productions.

The long term simulations showed that, during the growth period N leaching in the SCL soil is much lower than in the SL soil. When applying optimum rates, N leaching for the SL soil is quite important (average of 88 kg ha⁻¹), with high N leaching peaks when N crop uptake fails.

References

- BLACK, C.A. 1992. Soil fertility evaluation and control. Ed. C.A. Black, Lewis Publishers.
- FERRER, F., VILLAR, J.M., VILLAR, P. and ARAN M. 1997. Impacto del nitrógeno presente en el agua de riego en la zona regable del Canal d'Urgell. XV Congreso Nacional de Riegos, Lleida 25-27 June 1997: 241-248.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL. 1993. Soil and Water Quality. An agenda for agriculture. National Academy Press.
- NDLOVU, L. 1994. Ph.D. Dissertation, Washington State University, Pullman, WA.
- NEETESON, J.J. 1993. Residual soil nitrate after application of nitrogen fertilizers to crops. 347-365. In Contamination of Groundwaters: Case studies. Edited by D.C. Adriano, A.K. Iskandar and I.P. Murarka. Advances in Environmental Science. Science Reviews.
- NETEESON, J.J. 1995. Nitrogen management for intensively grown arable crops and field vegetables. In: Nitrogen Fertilization in the Environment, Ed. P.E. Bacon,

-
- Marcel Dekker: 295-325.
- PALA, M., STOCKLE, C.O. and HARRIS, H.C. 1996. Simulation of durum wheat (*Triticum durum*) growth under differential water and nitrogen regimes in a Mediterranean type of environment using CropSyst. *Agric. Syst.*, 51: 147-163.
- STOCKLE, C.O., MARTIN, S.A., and CAMPBELL, G.S. 1994. CropSyst, a cropping systems simulation model: water/nitrogen budgets and crop yield. *Agric. Syst.*, 46: 335-359.
- STOCKLE, C.O. and NELSON, R.L. 1996. CropSyst User's Manual. Biological System's Engineering Dept., Pullman, Washington, USA, Washington State University.
- VILLAR, P., STOCKLE, C.O. and 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.

ANEJO IV. Impacto del nitrógeno presente en el agua de riego en la zona regable del Canal de Urgell.

ANEJO IV

IMPACTO DEL NITROGENO PRESENTE EN EL AGUA DE RIEGO EN LA ZONA REGABLE DEL CANAL DE URGELL.

Este artículo se presentó de forma oral en el XV Congreso Nacional de Riegos, Lleida 25-27 Junio 1997: 241-248.

1. Introducción

El papel contaminante de los nitratos se ha descrito en numerosas obras científicas (Isermann, 1990, 1991; Addiscot y col., 1991) y de divulgación (Frisch y col., 1984, University of California, 1980). Los nitratos en el agua no son tóxicos por sí mismos. El problema es la conversión a nitrito (Addiscott y col., 1991). Los problemas asociados a la ingestión de nitrito y/o nitrito son la metahemoglobinemia y el cáncer de esófago y de estómago. La Unión Europea considera como contenido límite de nitratos en el agua potable los 50 mgL^{-1} ($11.3 \text{ mg N-NO}_3\text{L}^{-1}$) (Council of the European Communities (1980), citado por Addiscott y col., 1991). La OMS (Organización Mundial para la Salud) establece dos límites, recomendando no pasar de 50 mgL^{-1} y un máximo de 100 mgL^{-1} ($22.6 \text{ mg N-NO}_3\text{L}^{-1}$) según Addiscott y col., 1991.

La calidad del agua de riego en la zona regable del Canal d'Urgell presenta una variabilidad enorme. Desde sectores que riegan exclusivamente con agua procedente del Canal y las acequias principales, hasta sectores que utilizan el 100% del agua que proviene de pozos (Arqué, S., 1996. Comunicación personal). De hecho, la calidad del agua de riego en la zona puede agruparse en tres categorías:

1. Agua de canales

Agua que proviene del río Segre captada directamente del embalse de Oliana, exenta de sales (Conductividad eléctrica menor de 0.6 dS m^{-1}) i con bajo contenido en nitratos.

3. Agua de pozos

Agua que proviene del acuífero del Pla d'Urgell. Esta agua se utiliza como riego de soporte durante los meses de máxima demanda de agua en la zona (julio i Agosto), ya sea regando directamente los cultivos o bien mezclándola con agua limpia de los canales. La gestión de los pozos es a cargo de las comunidades de regantes o de particulares. El Canal d'Urgell está organizado en 21 colectividades. Las profundidades de los pozos oscilan entre 1 y 10 m, con la mayoría situados entre 1 y 3 m (DARP, 1986).

El nivel de nitratos que presentan es muy variable y depende mucho de la localización del pozo, y en concreto de la proximidad a canales o desguaces (azarbes), vertederos de aguas fecales, profundidad del freático y tipo de suelo.

2. Agua de desguaces

El agua que proviene de los desguaces es la que presenta más variabilidad en cuanto al nivel de nitratos se refiere, básicamente debido al múltiple origen de sus aguas. Se pueden diferenciar cinco tipos de orígenes distintos:

- 2.1. Agua de canales. Corresponde a agua limpia que alimenta los desguaces durante el periodo de riego (de mediados de Marzo a principios de Septiembre).
- 2.2. Aguas de escorrentía que provienen de la escorrentía superficial del propio riego durante el periodo de riego (de mediados de Marzo a principios de Septiembre).
- 2.3. Aguas de drenaje que percolan a través del suelo y que pueden arrastrar los nitratos y las sales presentes en el suelo. Se producen durante el periodo de riego y durante el periodo sin riego de septiembre a principios de Marzo) cuando hay lluvias abundantes.
- 2.4. Vertidos controlados e incontrolados de purines i aguas fecales de núcleos urbanos. Se producen durante todo el año.
- 2.5. Aguas que provienen de pozos como soporte del riego durante los meses de Julio y Agosto.

Así pues, existe una gran variabilidad en el contenido de nitratos de estas aguas, según sea el tipo de aguas que lleve, que depende así mismo de la localización (cerca de una granja o núcleo urbano, posición en la red de drenaje) y según la época del año.

Con el fin de evaluar la contribución del nitrógeno aportado por el agua de riego en la nutrición de los principales cultivos de la zona (Alfalfa, Maíz, Trigo, Peral y Manzano), se tienen que cuantificar sus necesidades de fertilización N. Esta cuantificación lleva implícita una estimación del N aportado por el suelo (N mineral presente en la zona radicular en presiembra y N aportado por la mineralización neta de la materia orgánica) y el agua de riego, y una estimación de las extracciones de N del cultivo. Existen diferentes metodologías para estimar el N aportado por el suelo y obtener curvas de respuesta del cultivo a la fertilización en condiciones de campo, y que permitan establecer unas recomendaciones de la fertilización N.

El presente estudio pretende únicamente de dar una idea sobre la contribución que supone el N aportado por el agua de riego en función de su contenido en nitratos, y comparar estas aportaciones con las extracciones N de los principales cultivos de la zona.

2. Antecedentes

Existen varios trabajos de campo realizados en la zona, que proporcionan datos de los niveles de nitratos en las aguas de riego y de pozos:

1. *El control de la calidad del agua subterránea en Catalunya (Niñerola, J.M., 1996)*. Presenta los resultados de los análisis de aguas realizados en la red de veinte pozos de muestreo que la Junta de Sanejament de la Generalitat de Catalunya tiene situados en el aluvial del Pla d'Urgell desde 1995.

2. *Estudi de la qualitat agronòmica de l'aigua de reg de la comarca del Pla d'Urgell. Any 1992 (Consell Comarcal del Pla d'Urgell, 1992)*. Estudio de la cualidad del agua de riego en doce puntos situados en desguaces y de tres puntos situados en canales. El estudio comprende tres muestreos mensuales para cada punto y, el análisis de la muestra mensual resultado de la composición de los tres muestreos. El periodo de muestreo abarca desde Septiembre de 1991 a Agosto de 1992.

3. *Estudi de la qualitat de l'aigua de reg a la zona regable del Canal d'Urgell. Any 1985 (Generalitat de Catalunya, DARP, 1986)*. Estudio realizado durante el año 1985 (Julio, Agosto y Septiembre) de la cualidad de las aguas de canales (6 puntos), desguaces (18 puntos) y pozos (22 puntos).

4. *Estudi de la qualitat de l'aigua de reg a la zona regable del Canal d'Urgell. Any 1984 (Generalitat de Catalunya, DARP, 1985)*. Estudio realizado durante el año 1984 (Julio, Agosto y Septiembre) de la cualidad de las aguas de canales (6 puntos), desguaces (18 puntos) y pozos (22 puntos). Existe también el mismo estudio para el año 1983.

4. *Estudi de la contaminació de les aigües subterrànies del Pla d'Urgell (Lleida), el seu ús agrícola (DMACS, 1986)*. Estudio realizado desde Mayo de 1985 a Mayo de 1986, donde se muestrearon y analizaron, de forma bastante sistemática y exhaustiva, cincuenta y dos pozos situados dentro la zona regable del Canal d'Urgell.

3. Material y Métodos

Los estudios existentes sobre la calidad de las aguas de riego en la zona regable del Canal d'Urgell se han completado mediante medidas directas del nivel de nitratos en aguas de riego y en el freático. Este estudio forma parte del proyecto conjunto llevado a cabo por el Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl de la UdL i el Laboratori d'Anàlisi i Fertilitat de Sòls (LAF), que tiene como objetivo general la optimización de las prácticas de la fertilización N para trigo y maíz en la zona. Desde el año 1993 al presente (Febrero 1997), se han tomado medidas del nivel de nitratos en el agua de riego (bocas de riego y desguaces) mediante el uso del Nitracheck (Eijelkamp) junto con las bandas de plástico Merckoquant (Merck). Estas bandas llevan una pequeña esponja en el extremo donde se produce una reacción colorimétrica en contacto con una solución acuosa que contiene iones nitrato. La lectura colorimétrica posterior se realiza con el Nitracheck por reflectometría. La misma técnica se ha utilizado para la medición del nivel de nitratos en el freático en tubos piezométricos de PVC colocados en los campos de ensayo. Ambas medidas se realizan de forma periódica cada dos semanas aproximadamente.

4. Resultados y discusión

A partir de los datos disponibles sobre el nivel de nitratos de las aguas de riego utilizables en la zona regable del Canal d'Urgell, para cada tipo de agua se han establecido un intervalo posible con una media aproximada. Las aguas se han clasificado según su origen en: agua de canales, agua de desguaces, agua de pozos y agua del freático. Las aguas procedentes de desguaces se han clasificado a la vez en cuatro tipos según el periodo del

año. Excepto para las aguas procedentes de canales, existe una gran variabilidad en el contenido de nitratos del agua tal y como se ha comentado anteriormente.

Tabla 1. Niveles de nitratos de las diferentes aguas

Origen	NO ₃ (ppm) media	NO ₃ (ppm) intervalo	Observaciones
CANALES	7	0-15	
DESGUACE I <i>Periodo sin riego</i> <i>(Sept.-mediados Marzo)</i>	35	10-70	- Aguas procedentes de drenaje, escorrentía superficial y vertidos de purines y aguas fecales de núcleos urbanos
DESGUACE II <i>Periodo de riego</i> <i>(Marzo - principios</i> <i>Junio)</i>	30	10-50	- Periodo donde solamente se riega el trigo y la alfalfa, y no se bombea agua de pozos.
DESGUACE III <i>Periodo de riego</i> <i>(Princ. Junio - finales</i> <i>Julio)</i>	40	10-80	- Periodo de máxima demanda de agua (riego del maíz, alfalfa y frutales). - Periodo de bombeo de agua de pozos que se puede alargar hasta Agosto. - 10-20 ppm. Cuando es agua del canal con poca mezcla de agua de pozos. - >50 ppm. Aguas con predominio de purines o fecales, o con bombeo de pozos.
DESGUACE IV <i>Periodo de riego</i> <i>(Agosto - Princ. Sept.)</i>	30	10-60	
POZOS	65	9-278	Junio, Julio y Octubre (DMACS, 1986) 16% (< 40ppm), 47% (40-80ppm), 37% (>80ppm)
FREATICO	74	0-415	Datos de campo 1993-1996 23% (< 40ppm), 29% (40-80ppm), 59% (>80ppm)

En el momento de estimar la contribución del nitrógeno presente en el agua de riego en la nutrición de los principales cultivos de la zona, se considera un riego medio aprovechable por las plantas de 100 mm. Esta cantidad se aplica generalmente con riego a manta, con variaciones en cuanto a la eficiencia de riego y en el CRAD del suelo. Teniendo en cuenta esta dosis de riego, la Tabla 2 da las aportaciones de nitrógeno (kg ha⁻¹) en forma de nitratos, en función del nivel medio de nitratos del agua de riego y el número de riegos realizados.

Tabla 2. Aportaciones de N-NO₃ (kg ha⁻¹) del agua de riego.

NO ₃ riego (ppm)	N-NO ₃ (kg ha ⁻¹)							
	1 riego	2 riegos	3 riegos	4 riegos	5 riegos	6 riegos	7 riegos	8 riegos
1	0	0	1	1	1	1	2	2
5	1	2	3	5	6	7	8	9
10	2	5	7	9	11	14	16	18
15	3	7	10	14	17	20	24	27
20	5	9	14	18	23	27	32	36
25	6	11	17	23	28	34	40	45
30	7	14	20	27	34	41	47	54
35	8	16	24	32	40	47	55	63
40	9	18	27	36	45	54	63	72
45	10	20	30	41	51	61	71	81
50	11	23	34	45	56	68	79	90
55	12	25	37	50	62	75	87	99
60	14	27	41	54	68	81	95	108
65	15	29	44	59	73	88	103	117
70	16	32	47	63	79	95	111	126
75	17	34	51	68	85	102	119	135
80	18	36	54	72	90	108	126	145

Se considera que para la zona de estudio lo más normal es realizar de 2-4 riegos para el trigo (de Marzo a principios de Junio), de 6-8 riegos para el maíz (de principios de Junio a finales de Agosto), de 6-8 para la alfalfa (De Abril a principios de Septiembre y de 6-8 riegos en peral y manzano (de Mayo a mediados de Agosto). De esta manera y previo conocimiento del tipo de agua que se dispone en una determinada parcela, las Tablas 1 y 2 permiten calcular el N-NO₃ aportado por el agua de riego (Tabla 3).

Tabla 3. N-NO₃ (kg ha⁻¹) aportado por el agua de riego según su origen.

Origen agua	NO ₃ riego (ppm)	N-NO ₃ (kg ha ⁻¹)							
		1 riego	2 riegos	3 riegos	4 riegos	5 riegos	6 riegos	7 riegos	8 riegos
Canal	7	2	3	5	6	8	9	11	13
Desguace I	35	8	16	24	32	40	47	55	63
Desguace II	30	7	14	20	27	34	41	47	54
Desguace III	40	9	18	27	36	45	54	63	72
Desguace IV	30	7	14	20	27	34	41	47	54
Pozo	65	15	29	44	59	73	88	103	117
Freático	74	17	33	50	67	84	100	117	134

El cálculo de las extracciones N de los cultivos se ha realizado a partir de los contenidos N en planta o fruto utilizados en el LAF para la realización de las recomendaciones de abonado. La Tabla 4 muestra los contenidos de N y las extracciones para tres objetivos de cosecha considerados Bueno, Mediano y malo en la zona.

Tabla 4. Contenido N de los principales cultivos de la zona

Cultivo	Parte	N total	Unidades
Trigo	Grano + paja	23	(kg t ⁻¹ MS)
Maíz	Planta	22	(kg t ⁻¹ MS)
Alfalfa	Planta	28	(kg t ⁻¹ MS)
Peral	Fruto	70	(mg 100g ⁻¹)
Manzano	Fruto	55	(mg 100g ⁻¹)

Tabla 4bis. Extracciones N (kg ha⁻¹) para los principales cultivos de la zona y tres objetivos de cosecha.

Cultivo	Tipo año	Objetivo Cosecha (kg ha ⁻¹)	Extracciones N cultivo (kg ha ⁻¹)
TRIGO	BUENO	8000	190
	MEDIANO	6000	140
	MALO	3000	70
MAÍZ	BUENO	15000	330
	MEDIANO	12000	270
	MALO	9000	200
ALFALFA	BUENO	18000	500
	MEDIANO	15000	420
	MALO	12000	340
PERAL*	BUENO	60000	110
	MEDIANO	40000	100
	MALO	20000	90
MANZANO*	BUENO	60000	90
	MEDIANO	40000	80
	MALO	20000	70

* Para el cálculo de las estarcies en frutales se ha considerado una extracción N para las hojas correspondiente a una producción de unos 4000 kg hojas secas ha⁻¹, con un contenido medio de N de 1.5 - 2%.

Para el caso de la Alfalfa, al ser una leguminosa, se ha considerado que el N que necesita se obtiene de la fijación de N atmosférico por parte de los nódulos de las raíces. Combinando las Tablas 2, 3 y 4bis se obtiene la Tabla 5 que permite relacionar el N-NO₃ aportado por el agua de riego con las extracciones N y saber qué proporción representa.

Tabla 5. Contribución del N-NO₃ aportado por el agua de riego a las extracciones de N para el trigo y el maíz.

<i>N-NO₃ riego</i> (kg ha ⁻¹)	TRIGO			MAIZ		
	<i>(% aportado por el agua de riego)</i>					
	Año Bueno	Año mediano	Año Malo	Año Bueno	Año mediano	Año Malo
10	5	7	14	3	4	5
20	11	14	29	6	8	10
30	16	22	43	9	11	15
40	22	29	58	12	15	20
50	27	36	72	15	19	25
60	33	43	87	18	23	30
70	38	51	100	21	27	35
80	43	58	100	24	30	40
90	49	65	100	27	34	45
100	54	72	100	30	38	51
110	60	80	100	33	42	56
120	65	87	100	36	45	61
130	71	94	100	39	49	66
140	76	100	100	42	53	71

Tabla 5bis. Contribución del N-NO₃ aportado por el agua de riego a las extracciones de N para Peral y Manzano.

<i>N-NO₃ riego</i> (kg ha ⁻¹)	PERAL			MANZANO		
	<i>(% aportado por el agua de riego)</i>					
	Año Bueno	Año Mediano	Año Malo	Año Bueno	Año Mediano	Año Malo
10	9	10	12	11	12	14
20	18	20	23	22	24	28
30	26	30	35	32	37	42
40	35	40	47	43	49	56
50	44	50	58	54	61	70
60	53	60	70	65	73	85
70	61	70	81	75	85	99
80	70	80	93	86	98	100
90	79	90	100	97	100	100
100	88	100	100	100	100	100
110	96	100	100	100	100	100
120	100	100	100	100	100	100

En el caso más desfavorable que se riegue con agua de desguace, en Trigo se llegan a aportar de 20 a 30 kg ha⁻¹ N-NO₃ (11 - 43% de las extracciones), en Maíz unos 50-60 kg ha⁻¹ N-NO₃ (15 - 30% de las extracciones), en Peral unos 60 kg ha⁻¹ N-NO₃ (53-70% de las extracciones) y en Manzano unos 60 kg ha⁻¹ N-NO₃ (65-85% de las extracciones). Estos porcentajes no se pueden tomar de forma absoluta y restar directamente a la cantidad de fertilizante N a aportar. En primer lugar, hay que considerar que el ritmo de absorción de N de la planta no corresponde con el ritmo de aportación N con el riego, y en consecuencia parte del N aportado con el agua de riego no será aprovechado por el cultivo. Otro aspecto derivado del anterior es el problema de aportes tardíos de N en peral y manzano que favorecen la aparición de Bitter-pit en la fruta. Por último, cabe señalar que ha nivel de parcela hay grandes variaciones, en tiempo y en espacio, en la cantidad aplicada en cada riego (pudiendo variar entre 80 y 120 mm), en la eficiencia del riego, y en la CRAD del

suelo, que hacen que el volumen de agua que se queda en el suelo en cada riego sea muy variable. Otro aspecto ya comentado, es la gran variabilidad en el contenido de nitratos del agua, que incrementa la incertidumbre en las determinaciones del N aportado con el agua de riego.

5. Conclusiones

En el caso del riego con aguas de desguace, en término medio, el agua de riego aporta cantidades de N que oscilan entre un 11 y un 85% de las extracciones de los principales cultivos de la zona.

El N aportado por el agua procedente de los canales, en términos generales es menor del 20% de las extracciones de los principales cultivos de la zona.

Hay que tener precauciones a la hora de relacionar el N aportado por el agua de riego con las necesidades de la fertilización N del cultivo, debido a que estas aportaciones no coinciden con el ritmo de extracción de N de los principales cultivos.

Por último, hay que tomar los resultados expuestos con precaución debido, a la variación del volumen aprovechable de agua aplicado en cada riego, y a la variación del contenido de nitratos del agua de riego.

Agradecimientos

Al departamento de Medio Ambiente de la Generalitat de Catalunya. Al proyecto CDTI. Al Ing. Salvador Arqué de la Casa Canal de Mollerussa.

Referencias bibliográficas

- Consell Comarcal del Pla d'Urgell. 1992. Estudi de la qualitat agronòmica de l'aigua de reg a la comarca del Pla d'Urgell. Any 1992.
- DARP. 1985. Estudi de la qualitat de l'aigua de reg a la zona regable del Canal d'Urgell. Any 1984.
- DARP. 1986. Estudi de la qualitat de l'aigua de reg a la zona regable del Canal d'Urgell. Any 1985.
- DMACS. 1986. Estudi de la contaminació de les aigües subterrànies del Pla d'Urgell (Lleida), el seu ús agrícola.
- Niñerola Pla, J.M. 1996. El control de la calidad del agua subterránea en Cataluña, pp. 199-208. Actas de las jornadas de la AIH: Las aguas subterráneas en las cuencas del Ebro, Júcar e internas de Catalunya y su papel en la planificación hidrológica. Lleida, Febrero 1996.

ANEJO V. Mapa de localización de las parcelas experimentales.

ANEJO V

MAPA DE LOCALIZACIÓN DE LAS PARCELAS EXPERIMENTALES

