

EFICIENCIA DE USO Y DINÁMICA DEL NITRÓGENO EN UNA ROTACIÓN CON Y SIN USO DE RESIDUOS¹

Nitrogen use efficiency and dynamics in a rotation with and without use of residues¹

Erick Zagal^{2*}, Nicasio Rodríguez³, Iván Vidal² y Glenn Hofmann⁴

ABSTRACT

With the objective of studying N use efficiency and dynamics in a rotation with and without management of residues, a labeled-N (¹⁵N) experiment was established, in a volcanic soil (Typic Melanoxerand), under irrigation. ¹⁵N-labeled micro-plots were installed on a 4-year rotation. ¹⁵N was applied only once, as labeled fertilizer or residue, to later follow its fate in the rotation. Treatments applied were as follows: i) T1, rotation with incorporation of residues and inorganic labeled-N; ii) T2, rotation with incorporation of residues and organic labeled-N; iii) T3, rotation without incorporation of residues and inorganic labeled-N. The DM yields of T1 and T3 after two growing seasons, maize (*Zea mays*) - wheat (*Triticum aestivum*) was 32.0 and 30.7 t ha⁻¹, respectively, and no significant differences were observed. In this study, maize residues were not a significant source of N for the next crops in the rotation. Incorporation of residues (additional C input) did not lead to higher N retention in the crop system studied for the period considered.

Key words: ¹⁵N, crop rotation, irrigation, maize, wheat, volcanic soil.

RESUMEN

Con el objeto de estudiar la eficiencia de uso y la dinámica del N en una rotación, con y sin manejo de residuos, se estableció un experimento con N marcado (¹⁵N), en un suelo volcánico (Typic Melanoxerand) bajo condiciones de riego. Se instalaron micro-parcelas con ¹⁵N en un ensayo de rotaciones de cuatro años. El ¹⁵N se aplicó sólo una vez, como fertilizante o residuo marcado, para posteriormente determinar su destino en la rotación. Los tratamientos aplicados fueron los siguientes: i) T1, rotación con incorporación de residuos y N inorgánico marcado; ii) T2, rotación con incorporación de residuos y con N orgánico marcado; iii) T3, rotación sin incorporación de residuos con N inorgánico marcado. La producción de MS total de los tratamientos T1 y T3 después de dos estaciones de crecimiento, maíz (*Zeamays* L.)-trigo (*Triticum aestivum* L.) fue de 32,0 y 30,7 t ha⁻¹, respectivamente, y no se observaron diferencias significativas. En este estudio, los residuos de maíz no constituyeron una fuente de N importante para los cultivos siguientes en la rotación. El manejo de residuos (adición extra de C) no condujo a una mayor retención del N en el sistema de cultivos estudiado y período considerado.

Palabras clave: ¹⁵N, rotación de cultivos, riego, maíz, trigo, suelo volcánico.

¹ Recepción de originales: 09 de abril de 2002.

² Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía, Casilla 537, Chillán, Chile. E-mail: ezagal@udec.cl *Autor para correspondencia.

³ Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Quilamapu, Casilla 426, Chillán, Chile.

⁴ Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Casilla 160-C, Concepción, Chile.

INTRODUCCION

El uso creciente de fertilizantes inorgánicos a partir de la segunda mitad del siglo veinte, ha conducido a una disminución de la aplicación de enmiendas orgánicas (Bøckman *et al.*, 1990). Sin embargo, actualmente existe un renovado interés en el manejo de residuos de cosecha, puesto que esta práctica mejora la calidad del suelo, y así sustenta su fertilidad y productividad (Kumar y Goh, 2000).

Los residuos de cosecha son un recurso natural extraordinario y no deben catalogarse como desperdicios. Su manejo tiene implicancias importantes respecto de la cantidad total de nutrientes que se extraen del suelo. Se puede ahorrar una cantidad considerable de fertilizantes reciclando los residuos de las cosechas.

Aunque grandes cantidades de nutrientes son removidas del sistema suelo por la fracción cosechada de la planta (grano, tubérculo, etc.) cantidades significativas permanecen en los residuos después de la cosecha (Prasad y Power, 1991; Kumar y Goh, 2000; Kumar *et al.*, 2001). Determinaciones de N, P, K, S, Ca y Mg, indican rangos aproximados de 5 a 21; 0,4 a 3; 14 a 25; 1 a 2; 1 a 6 y 0,4 a 1,4, kg t⁻¹ residuo, respectivamente. Las cantidades en el rango superior corresponden a contenidos encontrados en empastadas, y hacia el rango inferior aquellos determinados en la paja de distintos cereales (Kumar y Goh, 2000).

Un aspecto clave en el logro de la sustentabilidad a largo plazo en ecosistemas agrícolas es el mejoramiento de la eficiencia de uso de los nutrientes. Sin embargo, esta eficiencia debiera ser cuantificada considerando toda la secuencia de cultivos en una rotación. Más aún, la sustentabilidad está determinada por las pérdidas de nutrientes que ocurren en el sistema suelo. Así por ejemplo, si un sistema de cultivos recibe 100 kg N ha⁻¹, la capacidad de retención de este nutriente estará relacionada a posibles pérdidas que se produzcan por lixiviación, arrastre superficial o a la forma gaseosa.

Para que un suelo sea capaz de capturar, almacenar y reciclar nutrientes, la presencia de materia orgánica del suelo (MOS) es de vital importancia, ya que constituye un lugar de almacenamiento temporal de energía y nutrientes. Cuando esta energía almacenada es usada por los microorganismos, los nutrientes liberados pueden ser absorbidos por las plantas (Alexander, 1977; Jansson y Persson, 1982).

El mejoramiento de la calidad del suelo, a menudo relacionado con un incremento de la MOS, no sólo está vinculado al rol de ésta en la nutrición de cultivos, sino también con aumentos en la aireación, la capacidad de retención de agua del suelo, y mejoramiento de su estructura, lo cual minimiza la erosión y crea condiciones para un buen desarrollo radicular (Novoa *et al.*, 1989; Rasmussen y Collins, 1991).

Los incrementos en MOS y N por la adición de residuos de cosechas, dependen fundamentalmente de la cantidad del residuo agregado, condiciones ambientales del entorno (ej. temperatura, humedad, pH), y frecuencia de adición (Kumar y Goh, 2000). En climas templados, la adición permanente de residuos ha mostrado incrementos en los contenidos, tanto de C como N (Persson y Kirchmann, 1994; Jarvis *et al.*, 1996). Por otro lado, el efecto de los residuos en el contenido de MOS no tiene una relación estrecha con el tipo de residuo aplicado (Rasmussen y Collins, 1991).

La recuperación por el cultivo del N aplicado, sea proveniente de residuos o fertilizantes, es el producto de mineralización neta y eficiencia con la cual el N inorgánico es asimilado por las plantas. En general, estudios utilizando fertilizantes marcados (¹⁵N) han encontrado que entre 20 a 87% del N aplicado es recuperado en el primer cultivo, 10 a 35% es retenido en el suelo, y 1 a 35% es asignado a pérdidas (Powlson *et al.*, 1986; Pino *et al.*, 1996; Vidal *et al.*, 2000; Kumar y Goh, 2000; Urquiaga, 2000). El rango de variación en el N recuperado en el cultivo en estos estudios se explica por las diferentes fuentes de N aplicadas, diferentes niveles de fertilización usados, clima, prácticas de manejo, y cultivo utilizado (Kumar y Goh, 2000). Por otro lado, la fracción del N

recuperado por cereales varía dependiendo de la procedencia del N. Cuando su origen son residuos de leguminosas, la recuperación es aproximadamente la mitad de cuando se aplican fertilizantes nitrogenados inorgánicos, la cual puede verse reducida hasta un 25% cuando el N es derivado de plantas no leguminosas (Bremner y van Kessel, 1992; Kumar y Goh, 2000; Kumar *et al.*, 2001).

El conocimiento actual de la eficiencia de uso y dinámica de nutrientes no habría sido posible sin el uso de las técnicas isotópicas (Boutton, 1991 a, b; Voroney *et al.*, 1991; Powlson y Barraclough, 1993; Stevenson y Cole, 1999). Éstas no sólo permiten determinar el flujo de un nutriente en el sistema de cultivos, sino también su destino. Un entendimiento detallado de los procesos que controlan el flujo del nutriente entre las distintas fuentes y reservorios, y estos últimos transformándose en fuentes otra vez, sólo puede ser obtenido con isótopos tales como ^{14}C , ^{13}C , ^{15}N y ^{32}P .

En Chile, los andisoles ocupan extensas áreas de gran importancia agrícola y forestal, especialmente en la zona sur del país. En muchos de estos suelos la quema de rastrojos es una práctica común entre los agricultores, manejo que pone en peligro su fertilidad y la sustentabilidad de estos ecosistemas. Por ello, existe necesidad de generar información a nivel local acerca del ahorro de nutrientes y beneficios de la materia orgánica que los productores pueden alcanzar al dejar de quemar y comenzar a reciclar.

El objetivo de este estudio fue investigar la eficiencia de uso y dinámica del N después de una sola aplicación como fertilizantes inorgánicos o residuos, en una rotación con y sin manejo de residuos, para de esta forma entender las alteraciones que sufre la dinámica del N por efecto de la adición de C.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se condujo en la Estación Experimental Santa Rosa, perteneciente al Centro Regional de Investigación Quilamapu, del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) Chillán (36°31' lat. S; 71°54' long. O).

Suelo

El suelo de origen volcánico, serie Arrayán fase Diguillín, ha sido clasificado como un Typic Melanoxerand (Andisol). Algunas de sus características químicas, físicas y mineralógicas, se muestran en los Cuadros 1 y 2. La cantidad de alofán (Cuadro 2) fue determinada según Aran (1998). Brevemente, el suelo (1 g) fue extraído con oxalato de amonio ácido 0,2 M a pH 3 (80 mL) después de 4 h de agitación en la oscuridad. Luego el Al, Fe y Si extractables (Al_0 , Fe_0 , Si_0) fueron determinados por espectrofotometría de absorción atómica (EAA). En forma similar otras muestras fueron extraídas después de agitación por 16 h con 100 mL de pirofosfato de Na 0,1 M, pH 10, y después centrifugadas a 18.000 rpm por 20 min. Al igual que en la extracción anterior, el Al, Fe y Si extractables (Al_p , Fe_p , Si_p) fueron determinados por EAA. Las cantidades de alofán se calcularon a partir de las relaciones entre Al_0 , Al_p y Si_0 , $(\text{Al}_0 - \text{Al}_p / \text{Si}_0) \times (28/27)$, según Aran (1998) y Parfitt y Henmi (1982). En este suelo la relación molar fue 3,3 y el factor de multiplicación (FM) correspondiente a aplicar para calcular la cantidad de alofán fue 14,4. El contenido de alofán se determinó multiplicando este factor por el contenido de Si_0 (0,52 y 0,59% para las profundidades 0-10 y 10-35 cm, respectivamente).

Diseño experimental

Se instalaron microparcels con ^{15}N sobre un ensayo de rotaciones ya existente (tiempo experimental transcurrido 4 años) y proyectado a largo plazo. Este ensayo de parcela dividida fue diseñado para comparar seis rotaciones distintas (parcela principal) a dos niveles de fertilización (sub-parcelas, 100 y 70% y con cuatro repeticiones (bloques). En el presente trabajo se usaron dos rotaciones: i) con incorporación de residuos, que incluía la secuencia maíz (*Zea mays* L.), trigo (*Triticum aestivum* L.), frejol (*Phaseolus vulgaris* L.), cebada (*Hordeum vulgare* L.); y ii) sin incorporación de residuos que incluía la secuencia maíz, trigo, trébol rosado (*Trifolium pratense* L.), trébol rosado. El nivel alto de fertilización para cada cultivo correspondió a recomendaciones locales basadas en análisis de suelos, curvas de calibración de los cultivos y rendimientos esperados. En praderas sólo se aplicó P y K.

Cuadro 1. Propiedades químicas del suelo usado en el experimento (profundidad 0-20 cm). Serie Arrayán, fase Diguillín, Typic Melanoxerand.**Table 1. Chemical properties of the soil used in the experiment (depth 0-20 cm). Serie Arrayán, fase Diguillín, Typic Melanoxerand.**

Suelo	pH ¹	N _{total} ² (%)	MO ³	N _{min} ⁴ (mg kg ⁻¹)	P _{disp} ⁵	K ⁶	Ca ⁶ (cmol+ kg ⁻¹)	Mg ⁶	Na ⁶
T1 ⁷	5,75	0,43	9,0	58,3	12,3	0,33	4,84	0,54	0,35
T3 ⁸	5,16	0,46	8,7	113,4	11,4	0,17	3,99	0,56	0,33

¹ En agua (1:2,5).² N-total (Kjeldahl).³ Materia orgánica. Determinada por digestión húmeda.⁴ N-mineral. Extractado con K₂SO₄ 0,5 M y determinado por colorimetría.⁵ Extractado con solución Olsen.⁶ Cationes de intercambio. Extracción con CH₃COONH₄ a pH 7⁷ Rotación con manejo de residuos: maíz-trigo-frejoles-cebada.⁸ Rotación sin manejo de residuos: maíz-trigo-trébol rosado-trébol rosado.**Cuadro 2. Propiedades físicas y mineralógicas del suelo usado en el experimento (profundidad 0-20 cm). Serie Arrayán, fase Diguillín, Typic Melanoxerand.****Table 2. Physical and mineralogical properties of the soil used in the experiment (depth 0-20 cm). Series Arrayán, fase Diguillín, Typic Melanoxerand.**

Muestra	Arena ¹	Limo ¹ (%)	Arcilla ¹	Densidad ² aparente g cm ⁻³	Alofán ³ (%)
Serie Diguillín	73,2	23,4	3,4	1,08	8,0

¹ Método del hidrómetro de Bouyoucos.² Método del terrón.³ Según método descrito por Aran (1998). Corresponde a un promedio de los contenidos encontrados a las profundidades 0-10 y 10-35 cm.

La superficie de las parcelas principales y sub-parcelas correspondieron a áreas de 560 m² (40 x 14 m) y 280 m² (7 x 40 m) respectivamente. Las micro-parcelas con ¹⁵N se instalaron en un extremo de las sub-parcelas (nivel 100% de fertilización) en un área que comprendía 70 m² (7 x 10 m).

Diseño de experimento con ¹⁵N-marcado

El ¹⁵N se aplicó sólo una vez, como sal inorgánica o residuo marcado, para posteriormente determinar su destino en la rotación. El ¹⁵N como fertilizante inorgánico se aplicó al primer cultivo de la rotación (maíz). Los residuos marcados resultantes de la primera estación de crecimiento se aplicaron al segundo cultivo en la rotación (trigo). Los tratamientos aplicados fueron los siguientes: i) T1, rotación con incorporación de residuos y N inorgánico marcado; ii) T2, rotación con incorporación de residuos y con N orgánico marcado; iii) T3, rotación sin incorporación de residuos con N inorgánico marcado, y considerado como el tratamiento control.

Se dispusieron microparcelas, tanto para T1 como para T3, que permitieran medir rendimientos en trigo (2º cultivo en la rotación) sin y con fertilización nitrogenada (160 kg N ha⁻¹, aplicados a la macolla).

El tamaño de las micro-parcelas fue 9,7 m² (2,7 x 3,6 m, largo y ancho, respectivamente). Para marcar el maíz se aplicaron 300 kg N ha⁻¹ en la forma de urea (5,06% ¹⁵N exceso atómico). La dosis de N correspondió a la recomendación local. La urea se aplicó en solución para lograr una aplicación homogénea y después de la emergencia (plantas de 40 a 50 cm de altura). En consideración a la disponibilidad de N mineral al momento de la siembra (Cuadro 1) y para facilitar la aplicación del ¹⁵N, ésta se hizo sin parcializar, como se describió anteriormente.

Nivel aplicado y enriquecimiento en ¹⁵N de los residuos marcados (T2)

El nivel de residuos de maíz marcados fue de 8.000 kg ha⁻¹ (0,49% N), aplicados e incorporados antes

de la siembra de trigo (T2). El enriquecimiento en ^{15}N de los residuos de maíz fue 1,94% ^{15}N exceso atómico. Se aplicó una cantidad similar de residuos no marcados según correspondía (T1). El destino del ^{15}N de residuos marcados de maíz y trigo, se estudiaron en las rotaciones maíz-trigo-frejol-cebada, y maíz-trigo-trébol rosado-trébol rosado, respectivamente. En este estudio sólo se reportaron los resultados de residuos de maíz marcados. Una metodología similar ha sido empleada por otros autores que han estudiado la recuperación de ^{15}N en cultivos subsiguientes después de la aplicación de residuos marcados tanto de plantas no leguminosas como leguminosas (Bremner y van Kessel, 1992; Thomsen y Jensen, 1994; Kumar *et al.*, 2001).

Muestreo de suelo y plantas

Se tomaron muestras de suelo a tres profundidades (0-15, 15-30, 30-50 cm), antes de la siembra y aplicación de fertilizantes, y al momento de la cosecha. El área cosechada para maíz fue de 4,275 m^2 (2,25 x 1,90 m), que correspondió a 44% del área total de la microparcela. En trigo para T2, el área correspondiente fue de 3 m^2 . Sin embargo, para trigo en T1 y T3 el área cosechada fue de 4,5 m^2 . En el caso de frejoles, tercera estación de crecimiento, sólo se cosecharon 1,5 m^2 (1 x 1,5 m). El trébol rosado fue muestreado dos veces (1^{er} y 2^o cortes) durante la tercera estación de crecimiento y sólo una vez (último corte) durante la cuarta. Se muestreó un área de 1 m^2 en duplicado. El rendimiento en cebada, cuarto cultivo en T1 correspondió a un promedio de cinco muestras de 1 m^2 cada una, tomadas al azar en la parcela principal. Para el análisis de MS las plantas se separaron en sus componentes; para trigo y cebada en paja y caña; maíz en grano, caña y coronta; frejol en grano, tallo y vaina.

Análisis

A la cosecha se determinó MS después de haber secado el material a 60°C. El suelo fue secado al aire, y tanto el suelo como las plantas fueron finamente molidos (< 250 μm) para la determinación de N total y ^{15}N por combustión seca y espectrometría de masa, respectivamente (Barrie, 1991).

Cálculos

Se usaron las fórmulas propuestas por Zapata (1990) para cuantificar la cantidad de N en el cultivo derivada del fertilizante (Nddf), la cantidad de N en el suelo (Ndds), el ^{15}N recuperado en el cultivo (EUN) y ^{15}N recuperado en el cultivo más el encontrado en el suelo (de aquel adicionado) en el sistema suelo-planta.

$$\text{Nddf} = \text{N-planta (kg ha}^{-1}\text{)} \times \%^{15}\text{N exceso atómico en la planta}$$

$$\text{N-planta} = \text{MS (kg ha}^{-1}\text{)} \times \% \text{N} / 100 \quad (1)$$

$$\text{Ndds} = \text{N-planta (kg ha}^{-1}\text{)} - \text{Nddf (kg ha}^{-1}\text{)} \quad (2)$$

$$\text{EUN (\%)} = (\text{Nddf (kg ha}^{-1}\text{)} / \text{dosis de N}) \times 100 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{{}^{15}\text{N recuperado (Pl. + S) (\%)} &= (\text{Nddf} + \text{Ndds} \\ &(\text{kg ha}^{-1}\text{)} / \text{dosis de N}) \times 100 \\ \text{(Pl. + S)} &= \text{{}^{15}\text{N recuperado en la planta} + \text{{}^{15}\text{N} \\ &\text{recuperado en el suelo (0-50 cm)} \end{aligned} \quad (4)$$

Análisis estadístico

Todos los análisis se realizaron usando el paquete estadístico STATISTICA para Windows, Versión 5,5 (módulos Basic Statistics y ANOVA/MANOVA) (Stat Soft Inc., 2000).

Para comparar las medias de ^{15}N recuperado en el sistema suelo-planta de T1 y T3 se aplicaron pruebas de t. Estas mediciones se analizaron año a año o al final de tres años. Para este último análisis se consideró la suma del ^{15}N recuperado en los tres cultivos más el ^{15}N encontrado en el suelo al final del tercer cultivo. A pesar de los pocos datos disponibles, también se hicieron pruebas t para comparar las medias T1 + T2 versus T3. Se asumió que T1 representa el ^{15}N recuperado que proviene del suelo (suelo y raíces) y T2 el ^{15}N que proviene de las partes aéreas.

Se realizaron pruebas de t para comparar las medias de MS de T1 y T3. Se compararon sólo dos años (maíz-trigo) puesto que al tercer año T1 y T3 presentaban cultivos distintos. Las determinaciones de MS de totales de dos años fueron sometidos a un ANDEVA considerando

dos factores (tratamiento y año). Este modelo fue considerado mejor que las pruebas de *t* realizadas año a año.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Materia seca y contenidos de N

La MS y los contenidos de N para los distintos componentes de cosecha se muestran en los Cuadros 3 y 4. Los resultados indican que los rendimientos de maíz, después de cumplida una secuencia de 4 años, fueron similares entre tratamientos, con y sin manejo de residuos (Cuadro 3). Los contenidos totales de MS no fueron significativamente diferentes ($P = 0,3368$). Sin embargo, el rendimiento de trigo, cultivo subsiguiente a maíz, al no ser fertilizado, fue significativamente más bajo en la rotación con manejo de residuos (T1) en comparación con aquella sin manejo (T3) ($P = 0,0076$). La explicación más probable fue una inmovilización de N causada por los bajos contenidos de N en los residuos de maíz (0,48% N, Cuadro 4) que fueron

incorporados antes de la siembra. Así, el cultivo fue severamente afectado en los primeros estados de desarrollo. Por otro parte, cuando el trigo fue fertilizado, al completarse 5 años de iniciado el experimento, los rendimientos fueron más altos en la rotación con incorporación de residuos que en aquella sin incorporación de los mismos (Cuadro 3), y esta diferencia fue significativa ($P = 0,0062$). Esto concuerda con lo reportado por otros autores (Tian *et al.*, 1993; Dick y Christ, 1995; Kumar y Goh, 2000).

La comparación de rendimientos totales de MS en ambos tratamientos (rotaciones), después de dos estaciones de crecimiento (maíz-trigo), mostró, como se señaló anteriormente, que cuando el cultivo subsiguiente (trigo) no fue fertilizado, se obtuvieron rendimientos significativamente más bajos en T1 que en T3 ($P = 0,0261$), siendo la diferencia de 4 t ha⁻¹ (Cuadro 3). Por el contrario, cuando el cultivo subsiguiente en la rotación fue fertilizado los rendimientos fueron más altos en T1 que en T3, pero la diferencia fue pequeña (1 t ha⁻¹). La comparación

Cuadro 3. Rendimiento de materia seca (t ha⁻¹) en componentes de cosecha para cuatro cultivos sucesivos en dos rotaciones distintas, con y sin manejo de residuos.

Table 3. Dry matter yield of harvested parts for four successive crops in two different rotations, with and without residue management.

Rotación	Materia seca (t ha ⁻¹)				Total
	Comp. 1 ¹	Comp. 2	Comp. 3	Comp. 4	
T1²					
Maíz	8,65 (1,48) ³	8,41 (0,59)	1,71 (0,24)		18,8
Trigo ⁴ (NF)	1,58 (0,29)	2,25 (0,38)			3,83
Trigo ⁵ (F)	5,35 (0,90)	7,85 (0,31)			13,2
Frejol	1,55 (0,30)	0,49 (0,09)	0,72 (0,16)		2,76
Cebada	6,19 (0,71)	7,88 (0,90)			14,1
T3²					
Maíz	8,85 (1,68)	9,81 (0,81)	1,87 (0,25)		20,5
Trigo ⁴ (NF)	2,63 (0,41)	4,11 (0,94)			6,74
Trigo ⁵ (F)	4,31 (0,52)	5,89 (0,53)			10,2
Trébol rosado	1,65 (0,71)	2,70 (0,63)	1,92 (0,54)	1,45 (0,33)	7,72
Trébol rosado	2,50 (0,20)	2,35 (0,19)	0,67 (0,19)	1,05 (0,25)	6,57

¹Maíz = Componentes 1, 2, 3 (grano, caña, coronta). Trigo = Componentes 1, 2 (grano, paja). Frejol = Componentes 1, 2, 3 (grano, tallos, vainas). Cebada = Componentes 1, 2 (grano, paja). Trébol rosado = Componentes 1, 2, 3, 4 (1°, 2°, 3° y 4° corte).

²T1 y T3, con y sin manejo de residuos, respectivamente.

³Desviación estándar (n = 4).

⁴NF = trigo no fertilizado con N.

⁵F = trigo fertilizado con N.

Después de dos estaciones de crecimiento (maíz-trigo) sólo hubo diferencias significativas ($P < 0,05$) entre tratamientos cuando no se aplicó N en trigo. Ver texto.

de ambos experimentos (por ejemplo, distinto manejo del N en trigo siguiendo a maíz) mostró una clara interacción experimento-tratamiento ($P = 0,0236$), y sugirió que no se determinaron bajas en los rendimientos cuando el trigo fue fertilizado. Estos resultados concuerdan con aquellos publicados por otros autores y que establecen que bajo condiciones óptimas de fertilidad, adecuada disponibilidad de agua del suelo, y ausencia de pestes y enfermedades, los rendimientos alcanzados no se ven afectados por las diferentes prácticas de manejo, como por ejemplo, fertilización nitrogenada o riego (Undersander y Reiger, 1985; Rasmussen y Rhode, 1988; Kumar y Goh, 2000).

Los contenidos de N (Cuadro 4) se mostraron, como es normal, más altos en el grano que la paja. Igualmente, las plantas leguminosas presentaron contenidos más altos de N que las no leguminosas. El contenido de N de los residuos marcados de maíz usados en T2 fue bajo, $0,48 \pm 0,05$ (1,94% ^{15}N exceso atómico).

Eficiencia de uso del fertilizante- ^{15}N (o recuperación en el cultivo) y ^{15}N recuperado en plantas de maíz y suelo

Durante la primera estación de crecimiento (cuando se marcó maíz), el ^{15}N recuperado en la cosecha fue usado para calcular tanto la eficiencia de uso del fertilizante- ^{15}N (o recuperación en el cultivo), como el ^{15}N recuperado en el sistema planta-suelo (Cuadro 5). Los resultados mostraron sólo pequeñas diferencias en ^{15}N recuperado en el cultivo entre tratamientos, con cantidades levemente más altas en el tratamiento con manejo de residuos ($P = 0,2930$). En el suelo (profundidad 0-50 cm) no hubo diferencias significativas entre tratamientos ($P = 0,9698$). El total de ^{15}N recuperado (planta + suelo) fue 14% más alto en el tratamiento con incorporación de residuos (T1) que en aquel sin incorporación (T2), pero la diferencia no fue significativa ($P = 0,8320$). Las correspondientes cantidades no encontradas de ^{15}N (pérdidas) fueron 17 y 30% y se consideraron moderadas (Powlson *et al.*, 1992; Powlson, 1993).

Cuadro 4. Contenido de N (%) en componentes de cosecha para cuatro cultivos sucesivos en dos rotaciones distintas, con y sin manejo de residuos.

Table 4. N content (%) in harvested parts for four successive crops in two different rotations, with and without residue management.

Rotación	Nitrógeno (%)			
	Comp. 1 ¹	Comp. 2	Comp. 3	Comp.4
T1²				
Maíz	1,53 (0,11) ³	0,48 (0,05)	0,34 (0,04)	
Trigo ⁴ (NF)	1,68 (0,12)	0,24 (0,03)		
Trigo ⁵ (F)	1,91 (0,20)	0,30 (0,04)		
Frejol	3,30 (0,44)	1,02 (0,33)	0,82 (0,09)	
Cebada	1,12 (0,05)	0,65 (0,08)		
T3²				
Maíz	1,54 (0,08)	0,63 (0,09)	0,35 (0,04)	
Trigo ⁴ (NF)	1,53 (0,06)	0,25 (0,02)		
Trigo ⁵ (F)	1,98 (0,03)	0,37 (0,03)		
Trébol rosado	2,97 (0,13)	nd	2,70 (0,31)	nd
Trébol rosado	nd	nd	nd	2,32 (0,53)

¹ Componentes varían para cada cultivo: Maíz = Componentes 1, 2, 3 (grano, caña, coronta). Trigo = Componentes 1, 2 (grano, paja). Frejoles = Componentes 1, 2, 3 (grano, tallos, vainas). Cebada = Componentes 1, 2 (grano, paja). Trébol rosado = Componentes 1, 2, 3, 4 (1°, 2°, 3° y 4° corte).

² T1 y T3, con y sin manejo de residuos respectivamente.

³ Desviación estándar ($n = 4$).

⁴ NF = trigo no fertilizado con N.

⁵ F = trigo fertilizado con N.

nd = no determinado.

Cuadro 5. Cantidades de N derivado del fertilizante (Nddf) y N derivado del suelo (Ndds) en los componentes caña, coronta y granos de maíz, y N retenido en el suelo (kg ha⁻¹) para una rotación con y sin manejo de residuos. N aplicado como urea (300 kg N ha⁻¹; 5,06% ¹⁵N átomos exceso).

Table 5. Amounts of N derived from fertilizer (Nddf) and N derived from soil (Ndds) in stalk, ear and kernel of maize and N retained in soil (kg ha⁻¹) in a rotation, with and without residue management. N applied as urea (300 kg N ha⁻¹; 5,06% ¹⁵N atom excess).

Muestra	T1 ¹		T3 ²	
	Nddf	Ndds	Nddf	Ndds
Caña	15,36 (1,30) ³	25,06 (2,46)	19,42 (2,17)	42,31 (8,40)
Coronta	2,58 (0,37)	3,20 (0,64)	2,27 (0,78)	4,30 (0,61)
Grano	55,07 (1,36)	76,88 (14,15)	42,51 (10,78)	92,80 (13,54)
Total	73,21	105,14	64,19	139,40
Suelo (0-50cm)	176,30 (38,2)		144,48 (32,1)	
EUN ⁴ (%)	24,40 (0,83)		21,40 (4,4)	
¹⁵ N rec. (S+Pl.) ⁵ (%)	83,2		69,6	

¹ Con manejo de residuos: maíz-trigo-frejol-cebada.

² Sin manejo de residuos: maíz-trigo-trébol rosado-trébol rosado.

³ Desviación estándar (n = 4).

⁴ Eficiencia de uso del fertilizante (utilización del fertilizante-N o N recuperado en el cultivo).

⁵ N recuperado en suelo + planta.

N retenido en el suelo (0-50 cm), EUN y ¹⁵N recuperado en el suelo más cultivo, no mostraron diferencias significativas entre tratamientos. Ver texto.

La recuperación de ¹⁵N en el cultivo para ambos tratamientos fue baja (24,4 y 21,4% para T1 y T3, respectivamente). Se ha reportado que la eficiencia de uso de fertilizantes-N en Latino América y la región del Caribe, fluctúa en el rango 19 a 89%, dependiendo del clima, suelo, tratamiento y manejo agrícola (Urquiaga, 2000). Las estimaciones más bajas están generalmente asociadas a bajos rendimientos producidos por limitaciones de agua o nutrientes. Sin embargo, otros estudios, en suelos fértiles y bajo condiciones de riego, y con buenos rendimientos, como en este estudio, también han encontrado baja recuperación de N en los cultivos. Como se ha discutido en esas investigaciones, es probable que estos resultados sean consecuencia de una alta disponibilidad de N nativo del suelo (Urquiaga, 2000), e indicando para nuestras condiciones que el nivel aplicado de 300 kg ha⁻¹ fue muy alto. La disponibilidad relativa del ¹⁵N para las plantas decrece debido a efectos de dilución con el N del suelo. También es conocido que en condiciones normales, la eficiencia de recuperación del nutriente disminuye

significativamente según el nivel aplicado, puesto que niveles muy altos pueden exceder la capacidad de asimilación del cultivo (Kumar y Goh, 2000).

Por otro lado, la ausencia de un tratamiento sin N (cero N) impidió el cálculo de la eficiencia de uso del fertilizante por el método de la diferencia, lo cual es siempre aconsejable. Rao *et al.* (1991) encontraron que las determinaciones de eficiencia de recuperación de N estimadas por el método de dilución isotópica pueden ser 20% más bajas que aquellas determinadas por el método de la diferencia. Esto debido a un efecto de interacción del N agregado al suelo (ANI, added nitrogen interaction; Jenkinson *et al.*, 1985), como por ejemplo, sustitución de ¹⁵N por ¹⁴N en los procesos de inmovilización y desnitrificación. Aumentos en la absorción del N del suelo y un efecto ANI positivo, observado con aumentos en los niveles de fertilización-N, han sido informados ampliamente en la literatura (Jenkinson *et al.*, 1985; Rao *et al.*, 1991). Fernández (1995) utilizando el método de la diferencia en maíz bajo condiciones de riego

del Valle Central y niveles de fertilización de 125; 250; 375 y 500 kg N ha⁻¹, encontró los siguientes valores de la eficiencia de uso del fertilizante: 34,8; 37,0; 32,7 y 27,5%, respectivamente. Estos resultados corroboran las diferencias sugeridas entre los distintos métodos para la determinación de la eficiencia de uso del fertilizante nitrogenado.

El destino de residuos-¹⁵N incorporados

El destino de residuos-¹⁵N marcados de maíz se muestra en la Figura 1. Las determinaciones incluyen dos cultivos sucesivos (trigo y trébol rosado).

Los resultados después de la incorporación de residuos marcados de maíz, muestran que la recuperación de N (del ¹⁵N adicionado) en el cultivo siguiente (trigo) fue 4% (1,63 kg ha⁻¹) y disminuyó a 0,5% (0,15 kg ha⁻¹) en el trébol rosado. El N recuperado en el trigo fue similar o levemente más bajo a aquel informado por otros autores usando residuos-N de plantas no leguminosas (Bremner y van Kessel, 1992; Thomsen y Jensen, 1994; Kumar *et al.*, 2001). La muy baja recuperación de N en el trébol se puede

explicar parcialmente por el proceso de fijación biológica de N (FBN) en este cultivo.

La recuperación total de N en el sistema suelo-planta fue levemente superior a 100% en ambos cultivos, 116 y 119% para trigo y trébol respectivamente (Figura 1). La suma del ¹⁵N recuperado en el trigo más el suelo (0-50 cm) fue de 45,62 kg ha⁻¹ y la cantidad correspondiente en el caso del trébol fue de 46,83 kg ha⁻¹. Ambos valores fueron ligeramente superiores a la cantidad adicionada (39,20 kg ha⁻¹) e indicaron alguna contaminación de muestras ocurrida durante el muestreo y/o preparación de las mismas para el análisis ¹⁵N. Por otro lado, estos resultados mostraron la alta retención de N ocurrida en el suelo y sugieren que la mayoría del N ha sido tanto inmovilizado como estabilizado en la MOS. La contribución de N al cultivo siguiente (trigo) de residuos en descomposición, de bajo contenido de N y sin fertilización nitrogenada se espera sea muy baja (Kumar *et al.*, 2001). A esto hay que agregar que debido al proceso de FBN en trébol rosado, la contribución del N del suelo no es relevante.

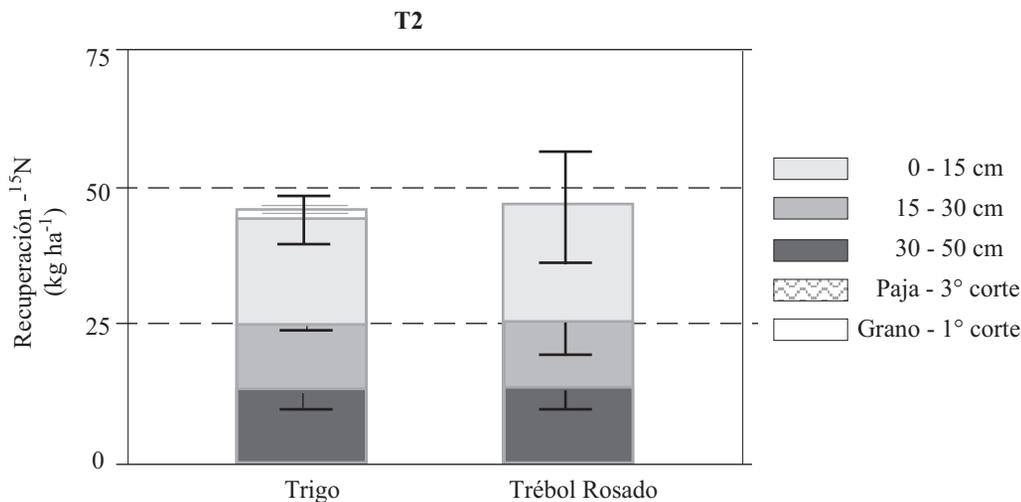


Figura 1. Destino de residuos-¹⁵N de maíz, en el suelo y cultivo, transcurridas dos estaciones de crecimiento. Recuperación de N (del ¹⁵N adicionado) en los cultivos siguientes de trigo y trébol rosado. Se observa que casi la totalidad del ¹⁵N recuperado está en el suelo y con una mínima cantidad determinada en la parte aérea de la planta.

Figure 1. Fate of ¹⁵N-maize residues, in soil and crop, after two growing seasons. Recovery of ¹⁵N (from the ¹⁵N added) in the succeeding wheat and red clover crops. Note that almost all ¹⁵N recovered is in the soil and with a very small quantity found in the aerial part of the plant.

El destino del fertilizante-¹⁵N en el cultivo y suelo transcurridas tres estaciones de crecimiento

La recuperación total de N en el sistema suelo-planta transcurridos tres cultivos sucesivos (T1, maíz-trigo-frejoles; y T3, maíz-trigo-trébol rosado) se muestra en la Figura 2. El N total recuperado (planta más suelo; 0-50 cm) después de cada estación de crecimiento, en el tratamiento incorporando residuos (T1), fue 249,5; 83,5; y 53,4 kg ha⁻¹ en maíz, trigo y frejoles respectivamente. Las cantidades correspondientes en el tratamiento

sin manejo de residuos (T3) fueron 219,8; 98,4; y 52,5 kg ha⁻¹. La comparación entre tratamientos (por estación de crecimiento) no mostró diferencias significativas en las cantidades de N recuperadas en el cultivo y retenidas en el suelo (P = 0,8320; P = 0,4900 y P = 0,9901 para el primer, segundo y tercer años respectivamente). Tampoco hubo diferencias significativas entre T1 y T3 (P = 0,4516) para la recuperación total de ¹⁵N al final de la tercera estación de crecimiento, por ejemplo ¹⁵N en el suelo más la suma del ¹⁵N recuperado en los 3 cultivos.

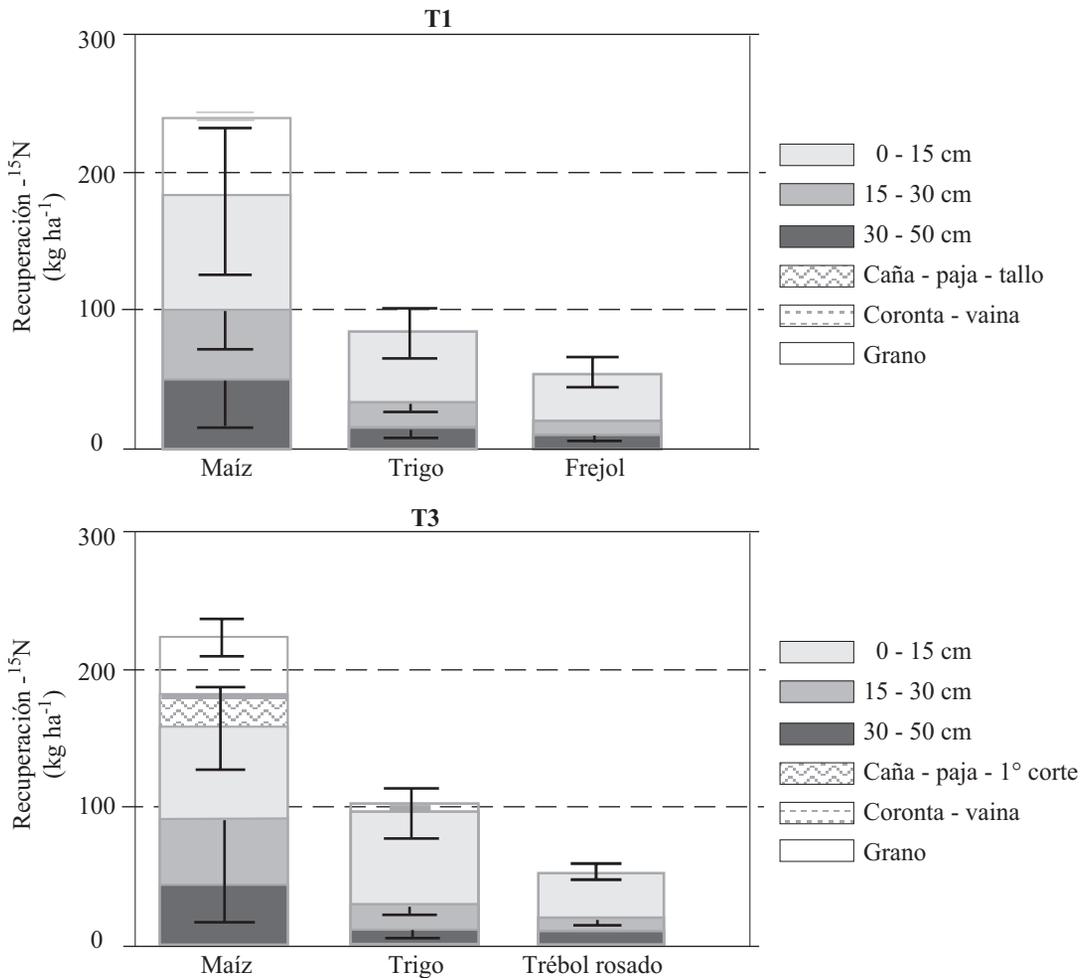


Figura 2. Destino del fertilizante-¹⁵N, en el suelo y cultivo, transcurridas tres estaciones de crecimiento en una rotación con (T1) y sin (T3) uso de residuos. No hubo diferencias significativas entre tratamientos. Se observa que después de la primera estación de crecimiento (maíz) casi la totalidad del ¹⁵N recuperado está en el suelo y con una mínima cantidad determinada en la parte aérea de la planta.

Figure 2. Fate of ¹⁵N-fertilizer, in soil and crop, after three growing seasons, in a rotation with (T1) and without (T3) residue management. There were no significant differences between treatments. Note that after the first growing season (maize) almost all ¹⁵N recovered is in the soil and with a minimum quantity found in the aerial part of the plant.

El N recuperado por el cultivo sólo fue relevante en el primer cultivo (Figura 2, Cuadro 4). La retención de N en el suelo en ambos tratamientos disminuyó en forma similar, y estas disminuciones fueron mayores a las esperadas, sugiriendo posibles pérdidas de una estación de crecimiento a la otra. Transcurrido el primer cultivo, 58,8 y 51,9% del fertilizante-N adicionado permanecía en el suelo en T1 y T3, respectivamente. Después de dos estaciones de crecimiento las cantidades correspondientes fueron 27,8 y 32,8%. Después de tres cultivos sucesivos, estas fueron 17,8 y 17,5%. Otros autores han informado cantidades más altas que las encontradas en este estudio después de una sucesión de tres cultivos (Kumar *et al.*, 2001). Probablemente, las mayores causas de pérdidas fueron debidas al mal manejo del agua (todos los cultivos eran de riego) y producidas principalmente por lixiviación más allá de los 50 cm, límite de profundidad de muestreo en este estudio. Una vez que el fertilizante es aplicado e incorporado al suelo, pérdidas por arrastre superficial (run-off) son menos probables (Ruiz y Araos, 1994). También existía el riesgo de pérdidas por el hecho de no haber un cultivo durante el invierno. Por otro lado, al inicio de primavera, cuando los procesos de mineralización aumentan rápidamente debido a temperatura y humedad adecuadas, las plantas están poco desarrolladas y puede aparecer el problema de sincronización mineralización-absorción, creando también condiciones de lixiviación. La posible aplicación de volúmenes de agua inapropiados pudo incrementar las pérdidas de N.

El enriquecimiento en ^{15}N tanto del cultivo como del suelo después del tercer cultivo estaba llegando a niveles cercanos a la abundancia natural (% ^{15}N exceso en suelo y cultivo entre 0,00014 y 0,00016). Debido al no aislamiento físico de las microparcels durante las labores de preparación de suelos y antes de la siembra del tercer cultivo, pudo haber ocurrido alguna mezcla de suelo del interior de las mismas con el suelo del exterior, diluyendo por lo tanto el N marcado en las micro-parcels. Por esta razón no se presentaron datos de recuperación de N en cultivo y suelo después del tercer cultivo. Otros

autores trabajando en condiciones similares han informado de problemas iguales (Kumar *et al.*, 2001).

Los resultados de este estudio, durante el período considerado, no confirman la hipótesis que el aumento en las adiciones de C conduce a un aumento en la retención de N en el sistema. Se pueden encontrar posibles explicaciones en la instalación de micro-parcels (con ^{15}N) en un experimento existente sólo de 4 años. Aparentemente, se necesita mucho más tiempo para comprobar una hipótesis como ésta, puesto que los cambios en la MOS son graduales. Por otro lado, los datos obtenidos en este estudio no permitieron una comparación segura al largo plazo del N total recuperado entre los tratamientos T1 + T2 versus T3, ya que se puede argumentar que T1 determina la recuperación que proviene del suelo y T2 aquella que proviene de la parte aérea. Considerando que después de una estación de crecimiento prácticamente todo el N de T2 permanecía en el suelo, al largo plazo se podría esperar un aumento en la retención de N del sistema incorporando residuos. La relevancia de este proceso dependería al mismo tiempo del N adicionado en los residuos, del tipo de cultivos en la rotación (plantas leguminosas versus no leguminosas) y de un manejo adecuado del agua de riego. Más aún, esta comparación también sugeriría menores disminuciones del N marcado del suelo, y niveles de estabilización en el tiempo distintos a aquellos mostrados anteriormente para los tratamientos T1 y T3.

CONCLUSIONES

1. El manejo de residuos no condujo a mayores rendimientos de MS, transcurridas dos estaciones de crecimiento (maíz-trigo).
2. En este estudio los residuos de maíz no constituyeron una fuente de N importante para los cultivos siguientes en la rotación.
3. El manejo de residuos (adición extra de C) no condujo a una mayor retención del N en el sistema de cultivos estudiado y período considerado.

RECONOCIMIENTO

El presente estudio se realizó con el apoyo de la Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA) mediante el contrato de Investigación No. 9032/R1, en el proyecto coordinado de investigación titulado: "The Use of Isotope Techniques in Studies on the Management of Organic and Nutrient Turnover for Increased, Sustainable

Agricultural Production and Environmental Preservation". Agradecemos también el apoyo prestado por la Dirección de Investigación de la Universidad de Concepción (DIUC) a través del proyecto apoyo de gestión FONDECYT (97.123.002-1.2), y a los Srs. Ciro Belmar, Roberto Ortiz y Manuel Zapata por el trabajo realizado en el control del experimento, la toma de muestras de suelo y análisis físicos, respectivamente.

LITERATURA CITADA

- Alexander, M. 1977. Introduction to Soil Microbiology. p. 467. John Wiley and Sons, New York, USA.
- Aran, D. 1998. Andosolisation dans Les Hautes Vosges. 202 p. Thèse Doctoral de l'Université Henri Poincaré. Centre de Pédologie Biologique, Centre Nationale de la Recherche Scientifique, Nancy-I, France.
- Barrie, A. 1991. New methodologies in stable isotope analysis. p. 3-36. Proceedings of Symposium Stable Isotopes in Plant Nutrition, Soil Fertility and Environmental Studies, Vienna. 1-5 October 1991. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- Boutton, T.W. 1991a. Stable carbon isotopes ratios of natural materials. I. Sample preparation and mass spectrometric analysis. p. 155-171. *In* D.C. Coleman and B. Fry (eds.). Carbon isotopes techniques. Academic Press, San Diego, California, USA.
- Boutton, T.W. 1991b. Stable carbon isotopes ratios of natural materials. II. Atmospheric, terrestrial, marine, and freshwater. p. 173-185. *In* D.C. Coleman and B. Fry (eds.). Carbon isotopes techniques. Academic Press, San Diego, California, USA.
- Bremner, E., and C. van Kessel. 1992. Plant-available nitrogen from lentil and wheat residues during a subsequent growing season. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:1155-1160.
- Bøckman, O.C., O. Kaarstad, O.H. Lie, and I. Richards. 1990 Agriculture and fertilizers. A report from Norsk Hydro. p. 245. Tangen Grafiske Senter, Drammen, Norway.
- Dick, R.P., and R.A. Christ. 1995. Effect of long-term residue management and nitrogen fertilization on availability and profile distribution of nitrogen. *Soil Sci.* 159:402-408.
- Fernández, M. 1995. Fertilización nitrogenada y su eficiencia en maíz de grano. *Simiente* 65:122-132.
- Jansson, S.J., and J. Persson. 1982. Mineralization and immobilization of soil nitrogen. *In* F. Stevenson (ed.). Nitrogen in agricultural soils. Agronomy Series N° 22. p. 229-251. Soil Sci. Soc. Am. Inc. Publ., Madison, Wisconsin, USA.
- Jarvis, S.C., E.A. Stockdale, M.A. Shepherd, and D.S. Powlson. 1996. Nitrogen mineralization in temperate agricultural soils: Process and measurement. *Adv. Agron.* 57:187-235.
- Jenkinson, D.S., R.H. Fox, and J.H. Rayner. 1985. Interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen – the so-called 'priming effect'. *J. Soil Sci.* 36:425-444.
- Kumar, K., and K.M. Goh. 2000. Crop residues and management practices: Effects on soil quality, soil nitrogen dynamics, crop yield, and nitrogen recovery. *Adv. Agron.* 68:197-319.
- Kumar, K., K.M. Goh, W.R. Scott, and C.M. Frampton. 2001. Effects of ¹⁵N-labelled crop residues and management practices on subsequent winter wheat yields, nitrogen benefits and recovery under field conditions. *J. Agric. Sci. (Cambridge)* 136:35-53.
- Novoa, R., M. Martínez, y E. Letelier. 1989. Comparación de un sistema de fertilización mineral con uno de fertilización orgánica, en una rotación trigo-frejol. Efectos sobre rendimiento y algunas propiedades físicas y químicas del suelo. *Agricultura Técnica (Chile)* 51:1-8.
- Parfitt, R.L., and T. Henmi. 1982. Comparison of an oxalate-extraction method and an infrared spectroscopic method for determining allophane in soil clays. *Soil Sci. Plant Nutr.* 28:183-190.
- Persson, J., and H. Kirchmann. 1994. Carbon and nitrogen in arable soils as affected by supply of N fertilizers and organic manures. *Agric. Ecosyst. Environ.* 51:249-255.
- Pino, I., A. Peyrelongue, y M. Buneder. 1996. Evaluación de fuentes nitrogenadas (¹⁵N) en tres variedades de trigo, en un Andisol y un Ultisol de la IX Region. II Parámetros isotópicos y uso eficiente de los fertilizantes. *Agricultura Técnica (Chile)* 56:187-192.
- Powlson, D.S. 1993. Understanding the soil nitrogen cycle. *Soil Use Manage.* 9:86-94.

- Powelson, D.S., and D. Barraclough. 1993. Mineralization and assimilation in soil-plant systems. p. 209-242. *In* R. Knowles and T.H. Blackburn (eds.). Nitrogen isotopes techniques. Academic Press, San Diego, California, USA.
- Powelson, D.S., P.B.S. Hart, P.R. Poulton, A.E. Johnston, and D.S. Jenkinson. 1992. Influence of soil type, crop management and weather on the recovery of ¹⁵N-labelled fertilizer applied to winter wheat in spring. *J. Agric. Sci.* 118:83-100.
- Powelson, D.S., G. Pruden, A. Johnston, and D.S. Jenkinson. 1986. The nitrogen cycle in the Broadbalk wheat experiment: recovery and losses of ¹⁵N-labelled fertilizer applied in spring and inputs of nitrogen from the atmosphere. *J. Agric. Sci.* 107: 591-609.
- Prasad, R., and J.F. Power. 1991. Crop residue management. *Adv. Soil Sci.* 15: 205-239.
- Rao, A.C.S., J.L. Smith, R.I. Papendick, and J.F. Parr. 1991. Influence of added nitrogen interactions in estimating nitrogen recovery efficiency of labeled nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 616-1621.
- Rasmussen, P.E., and H.P. Collins. 1991. Long-term impact of tillage, fertilizer, and crop residue on soil organic matter in temperate semi-arid regions. *Adv. Agron.* 45:93-134.
- Rasmussen, P.E., and C.R. Rhode. 1988. Long-term tillage and nitrogen fertilizer effects on organic nitrogen and carbon in a semi-arid soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52:1114-1117.
- Ruiz, R., y F. Araos. 1994. Fertilizante nitrogenado: al fondo del surco después de un riego. *Investigación y Progreso Agropecuario La Platina* N° 82 p. 20-22.
- StatSoft Inc. 2000. STATISTICA for Windows. Tulsa, Oklahoma, USA.
- Stevenson, F.J., and M.A. Cole. 1999. Cycles of soil. p. 427. 2nd ed. John Wiley and Sons, New York, USA.
- Thomsen, I.K., and E.S. Jensen. 1994. Recovery of nitrogen by barley following incorporation of ¹⁵N-labelled straw and catch crop material. *Agric. Ecosyst. Environ.* 49:115-122.
- Tian, G., L. Brussaard, and B.T. Kang. 1993. Biological effects of plant residues with contrasting chemical compositions under humid tropical conditions—effects on soil fauna. *Soil Biol. Biochem.* 25:731-737.
- Undersander, D.J., and C. Reiger. 1985. Effect of residue management on continuous production of irrigated winter wheat. *Agron. J.* 77: 508-511.
- Urquiaga, S. 2000. Eficiencia de la fertilización nitrogenada en los principales cultivos anuales. p. 31-49. *In* S. Urquiaga y F. Zapata (eds.). Manejo eficiente de la fertilización nitrogenada de cultivos anuales en América Latina y el Caribe. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Agrobiologia, Rio de Janeiro, Brasil.
- Vidal, I., E. Zagal, L. Longeri, and J.M. Hetier. 2000. Increasing nitrogen-use efficiency by wheat in volcanic ash soils. p. 159-175. *In* Optimizing nitrogen fertilizer application to irrigated wheat. Technical Document (IAEA-TECDOC)-1164. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- Voroney, R.P., J.P. Winter, and E.G. Gregorich. 1991. Microbe/plant/soil interactions. p. 77-99. *In* D.C. Coleman and B. Fry (eds.). Carbon isotopes techniques. Academic Press, San Diego, California, USA.
- Zapata, F. 1990. Isotope techniques in soil fertility and plant nutrition studies. p. 61-127. *In* G. Hardarson (ed.). Use of nuclear techniques in studies of soil-plant relationships. Training Course Series N° 2. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.