EFECTO DE TRES SISTEMAS DE MANEJO DE SUELO EN LA EFICIENCIA FISIOLÓGICA DE USO DE NITRÓGENO FERTILIZANTE EN TRIGO[1]

Effect of three soil tillage systems on physiological nitrogen use efficiency in wheat crop

Juan Luis Rouanet[1], Inés Pino[2], Ana María Parada[3], Adriana Nario[3]

ABSTRACT

Nitrogen fertilization is the most costly production factor in wheat cropping systems on Ultisols, one of the most eroded soil types in Southern Chile. The utilization efficiency of N-fertilizer was assessed in a wheat cultivar (*Triticum aestivum* L.) cv. Dalcahue growing under three soil tillage systems: Traditional, burning of crop residues/soil plow down (TRAD); no-till + burning (CL+Q), and no-till no burning (CL-Q). The method used measurements of grain yield, total N uptake by plants and their components: N derived from fertilizer (Nddf) and N derived from soil (Ndds). Physiological N use efficiency was evaluated for total plant N (EFNt = grain yield/Nddf +Ndds) and for N-fertilizer in plants (EFNf = grain yields/N-fertilizer). ^{15}N-labelled urea, 10% atom excess (a.e.) was added to the microplots at the rate of 150 kg N ha^{-1}. The fertilizer was applied three times: 10% at planting, 45% at tilling and 45% at jointing stage. There were no significant seasonal differences for wheat grain yield among tillage treatments with yield of 6.7 to 7.5 t ha^{-1} on 1997/98 and 4.6 to 5.4 t ha^{-1} on 1998/99 season. The treatments CL+Q in 1997/98 and TRAD in 1998/99 had the highest total N uptake. The CL-Q treatment showed lowest N-fertilizer uptake by plants for each season, while keeping similar grain yields as the other two tillage systems. This led to higher physiological nitrogen use efficiency on grain production per unit of N-fertilizer absorbed by plants.

Key words: soil tillage, sustainability, ^{15}N, isotopic technique, wheat, fertilization.

RESUMEN

El desarrollo de nuevos sistemas de manejo de suelo conservacionista está destinado a la protección del recurso suelo. Dado que la fertilización nitrogenada es el recurso de producción de más alto costo en los sistemas de producción de trigo en suelos Ultisoles, uno de los más erosionados en el sur de Chile, se requieren métodos que evalúen la eficiencia de uso de N y su potencial de incremento en estos sistemas. Se evaluó la eficiencia fisiológica o la eficiencia de utilización de N-fertilizante en trigo (*Triticum aestivum* L.) cv. Dalcahue, bajo tres sistemas de manejo de suelo: tradicional, quema de rastrojos e inversión del suelo (TRAD); cero labranza con quema (CL+Q);

[1]Recepción de originales: 31 de enero de 2000.
Trabajo realizado con aporte del Proyecto FONDECYT 1981116, aportes de OIEA, Proyectos CHI/5/020 y ARCAL XXII.

[2]Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Carillanca, Casilla 58-D, Temuco, Chile. E-mail: jrouanet@carillanca.inia.cl
[3]Comisión Chilena de Energía Nuclear, Departamento de Aplicaciones Nucleares, Casilla 188-D, La Reina, Santiago, Chile. E-mail: ipino@cchen.cl

y cero labranza sin quema (CL-Q). El uso de la técnica isotópica (^{15}N) permitió un análisis más discriminante de la eficiencia de uso de N en dos estaciones de crecimiento. El método utilizó mediciones de rendimiento de grano, absorción de N total por las plantas y sus componentes: N derivado del fertilizante (Nddf) y N derivado del suelo (Ndds). Se calculó la eficiencia fisiológica de uso de N para N total en la planta (EFNt) y para el N-fertilizante (EFNf). Se aplicaron 150 kg ha^{-1} de Urea marcada con ^{15}N 10% átomos exceso (a.e.), en forma parcializada, 10% a la siembra, 45% a macolla y 45% a inicio de encañado. El análisis dentro de cada temporada indicó ausencia de diferencias significativas entre medias de tratamientos para rendimiento en grano. La tendencia en magnitud para el rendimiento de grano de trigo para 1997/98 siguió el orden: CL+Q (7,5 t ha^{-1}), CL-Q (7,0 t ha^{-1}) y TRAD (6,7 t ha^{-1}). Para la temporada 1998/99, la tendencia siguió el orden TRAD (5,4 t ha^{-1}), CL-Q (4,9 t ha^{-1}) y CL+Q (4,6 t ha^{-1}). Los tratamientos CL+Q en 1997/98 y TRAD en 1998/99 presentaron una mayor absorción de N total, 121 y 128 kg ha^{-1} respectivamente. El tratamiento CL-Q presentó la absorción más baja tanto de N total (102 y 110 kg ha^{-1}) como de Nddf (44 y 46 kg ha^{-1}), para las temporadas 1997/98 y 1998/99, respectivamente. Dado que el rendimiento de grano fue similar al obtenido en los otros dos sistemas, éste implicó una EFNf resultante mayor en la producción de grano por unidad de N-fertilizante absorbido por la planta en CL-Q.

Palabras clave: manejo de suelos, sustentabilidad, ^{15}N, técnicas isotópicas, trigo, fertilización.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad tiene mucha importancia el tema de la sustentabilidad de la agricultura en condiciones de secano, donde el agua y la baja fertilidad natural del suelo son las principales limitaciones para aumentar la eficiencia de uso de los recursos naturales y económicos en la producción (Davis y Schirmir, 1987). El desarrollo de sistemas de manejo conservacionistas es importante en la reducción de costos de operaciones (Godoy y Rouanet, 1999), y se basa más en sus implicancias ambientales como el control de la erosión, uso de nitrógeno (N) y disminución de la contaminación por nitratos (Huggins y Pan, 1993) que en potenciar el rendimiento. Estos se diferencian del sistema tradicional por no presentar laboreo del suelo (inversión de las capas superiores), y conservar el residuo postcosecha sobre la superficie. El suelo se mantiene con cobertura durante todo el año, disminuyendo así el impacto de la lluvia y por consiguiente la erosión hídrica (Rao y Dao, 1996). Existen varios factores en un sistema de producción, entre otros, el uso de rotaciones adecuadas y el uso de sistemas alternativos de manejo de suelo, mediante los cuales se han observado avances potenciales en el incremento de la eficiencia de uso de N (Al-Darby y Lowery, 1986; Rao y Dao, 1996).

Con este enfoque productivo, y dado que el rendimiento de cultivos de cereales de grano pequeño depende de diversos factores, la evaluación del comportamiento vegetal en sistemas alternativos de manejo de suelo debería ser expresada en términos de eficiencia de uso equivalentes a cada uno de ellos (Pierce y Rice, 1988). La eficiencia indica producto por unidad de insumo, y a futuro, puede ser más correcto expresar la producción por unidad de agua, N, P, u otro insumo, a objeto de evaluar su efecto. La mejor relación a usar, cuya expresión es una medida de eficiencia, dependerá del elemento que es más limitante o más necesario conservar (Evans, 1980).

El concepto de eficiencia de uso de N desarrollado por Moll *et al.* (1982), provee un marco de referencia para la evaluación de la variación que experimentan los factores que la componen, permitiendo a su vez una comparación entre genotipos, en relación con los procesos fisiológicos de absorción y translocación de N en la planta. Un análisis de eficiencia de uso de nutrientes debe

enfatizar la respuesta del vegetal en cuanto a producción de grano por unidad de N absorbido en la planta, o eficiencia fisiológica de uso de N (EFUN) (Bock, 1984), o la eficiencia de utilización de N (Kanampiu *et al.*, 1997).

El uso de técnicas isotópicas es una herramienta adecuada para dar una respuesta a la problemática del manejo racional de la nutrición vegetal (Olson y Swallow, 1984; Powlson *et al.*, 1989). Rao *et al.* (1992) presentaron una revisión del método isotópico en cuanto al modo de medir esta eficiencia. Ellos indicaron que la medición de la eficiencia de uso de N por las plantas, con el método de ^{15}N, tiene una gran importancia en la medida que aumenten las aplicaciones de N, situación que se observa en el país, con uno de los mayores usos de fertilizante nitrogenado en América Latina (Urquiaga y Zapata, 2000). El uso de esta técnica hace posible identificar el abastecimiento de N en la planta, separando el N derivado del fertilizante (Nddf) de otras fuentes y del suelo (Ndds) (Zapata y Van Cleemput, 1986a, b).

El objetivo de este estudio fue evaluar la variación en la eficiencia fisiológica de uso de N total (EFNt) Bock (1984) y Moll *et al.* (1982) y en la eficiencia fisiológica de uso de N fertilizante (EFNf) mediante el uso de técnicas isotópicas, medidas a través de la variación de las relaciones entre producción de grano por unidad de N total absorbido en la planta, y entre producción de grano por unidad de ^{15}N fertilizante absorbido en la planta, respectivamente.

MATERIALES Y MÉTODOS

En mayo de 1997 y mayo de 1998, se estableció un ensayo de campo en la IX Región, Sector Nueva Imperial, fundo Buenos Aires (38°37' lat. Sur; 73°04' long. Oeste), el cual consideró el cultivo de trigo (*Triticum aestivum* L.) cv. Dalcahue, bajo tres sistemas de manejo del suelo. El suelo utilizado presenta una topografía de lomaje fuerte con pendiente de 15 a 20%, correspondiendo éste al orden Ultisol (Typic Hapludult). El sitio en donde se realizó el experimento tuvo avena (*Avena sativa* L.) como precultivo en el año 1996, y durante los 6 años anteriores se manejó con cero labranza sin quema de residuos.

El diseño experimental de terreno correspondió a un bloque completamente al azar con tres tratamientos y cuatro repeticiones por tratamiento; los tratamientos fueron: sistemas de manejo de suelo tradicional, con inversión de suelos y eliminación de residuos postcosecha mediante el uso de fuego (TRAD); cero labranza con quema de residuo (CL+Q); y cero labranza sin quema de residuo (CL-Q).

Se sembró el trigo cv. Dalcahue el 26 y 31 de mayo en la temporada 1997/98 y 1998/99, respectivamente, con una dosis de semilla de 160 kg ha^{-1} a una distancia de 18 cm entre surcos, con una sembradora manual tipo Planet. Cada unidad experimental (parcela de 10 x 3 m) se consideró como macro parcela con manejo de fertilizante comercial Urea y dentro de cada una de ellas se estableció una micro parcela (parcela isotópica) de 1,4 x 1,0 m con manejo de fertilizante urea marcada con 10% ^{15}N átomo exceso (a.e.) aplicada en una solución de 500 cm^3 de agua bidestilada. Se utilizó una dosis de 150 kg de N ha^{-1} aplicada en tres parcialidades, 10% a la siembra, 45% al estado de plena macolla, estado 25 (Zadok *et al.*, 1974) y 45% al inicio de encañado, estado 31 (Zadok *et al.*, 1974). La fertilización de los nutrientes P, K, Ca, Mg y S, fue determinada en base a análisis químico de laboratorio.

En cada temporada se realizó un muestreo de plantas a la cosecha; se analizó N total (Kjeldahl) y ^{15}N (espectrometría de emisión óptica). Los parámetros determinados fueron: rendimiento de materia seca (MS) y rendimiento de grano con 0% humedad base peso seco (HBPS), por unidad de superficie (hectárea). Mediante las relaciones propuestas por Rennie y Paul (1971), Hauck y Bremner (1976), y Zapata (1990), se calcularon por unidad de superficie, los kilogra-

mos de N en la planta proveniente del fertilizante (Nddf) y los kilogramos de N proveniente de otras fuentes encontradas en el suelo (Ndds), en base a las siguientes relaciones:

(1) kg Nddf = kg de N derivado del fertilizante en la planta.
= (% Nddf kg N total en planta)/100,
donde
% Nddf = (at. % ^{15}N exc. en planta/at. % ^{15}N exc en fertilizante marcado) 100
kg N total en planta = (% N planta) (kg MS a cosecha).

(2) kg Ndds = kg N total en planta – kg Nddf

La eficiencia fisiológica de uso de N total (EFNt) y eficiencia fisiológica de uso de N fertilizante (EFNf) se calcularon mediante las siguientes relaciones:

(3) EFNt = Gr/(Nddf+Ndds), donde (Gr) corresponde a producción de grano 0% HBPS por unidad de superficie; Nddf a N derivado del fertilizante, y Ndds a N derivado del suelo absorbido en la fitomasa aérea por unidad de superficie, y

(4) EFNf = Gr/Nddf, donde (Gr) corresponde a producción de grano 0% HBPS por unidad de superficie; y Nddf a N derivado del fertilizante absorbido en la fitomasa aérea por unidad de superficie.

Se realizó un ANDEVA para las variables dentro de cada temporada mediante un modelo de bloques completamente al azar con 4 repeticiones. Adicionalmente, se realizó un ANDEVA para EFNf mediante contrastes ortogonales, para evaluar el efecto combinado de las clases: sistemas de labranza (CL+Q, CL-Q y TRAD) y temporadas (1997/98 y 1998/99), originando como fuente de variación seis contrastes de la combinación entre ambas. La comparación entre medias para ambos ANDEVAS se realizó mediante el test de Scheffé.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La distribución de la precipitación para la temporada 1997/98, desde siembra hasta fines del período de barbecho de la siguiente temporada de siembra, señala que existió un superávit de aguas lluvias principalmente durante otoño y en el período primaveral (Cuadro 1). Aun cuando las precipitaciones en 1997 fueron un 80% superior al promedio de 27 años, dadas las características topográficas y de pendiente, el suelo se mantuvo sobre capacidad de campo tanto en estratas superficiales (0-20 cm) como subsuperficiales (40-80 cm). Desde el mes de agosto en adelante en la temporada 1997/98, la distribución de lluvias permitió un adecuado almacenaje y abastecimiento de agua en el suelo (Rouanet *et al.*, 1999a) favoreciendo los procesos de absorción de nutrientes y posteriormente el llenado de grano.

Durante la temporada 1998/99 se observó un desbalance hidrológico desde el mes de octubre, debido a las bajas precipitaciones, en especial

Cuadro 1. Distribución de la caída pluviométrica (mm) en el período estudiado (1997/98 y 1998/99) y promedio mensual de 27 años. Nueva Imperial

Table 1. Rainfall distribution (mm) during the 1997/98 and 1998/99 growing seasons and monthly average for 27 years. Nueva Imperial

Temporada	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	Total
1997/98	198,5	267,5	219,5	107,5	110,5	186,0	69,5	19,0	31,5	48,5	0,0	109,5	1.367,5
1998/99	65,5	119,0	96,5	145,0	64,5	16,0	8,5	0,0	17,0	6,0	19,5	49,5	607,0
Promedio 27 años	121,5	114,5	109,1	95,1	59,1	54,2	33,9	38,8	25,3	23,5	31,1	47,5	753,6

durante el período primaveral. Este déficit significó que el contenido de agua en el suelo, en el sitio del ensayo, alcanzara 30% de la humedad aprovechable desde fines de octubre en adelante (Rouanet *et al.*, 1999a), lo que habría afectado el llenado de grano, etapa fenológica que se inició en diciembre.

El análisis dentro de cada temporada indicó ausencia de diferencias significativas entre medias de tratamientos para el rendimiento en grano (Figura 1A, 1B). La tendencia en magnitud para el rendimiento de grano de trigo para 1997/98 siguió el orden: CL+Q (7,5 t ha^{-1}, 0% HBPS), seguido por el sistema CL-Q (7,0 t ha^{-1}, 0% HBPS) y TRAD (6,7 t ha^{-1}, 0% HBPS) (Figura 1A). Para la temporada 1998/99, la tendencia siguió el orden TRAD (5,4 t ha^{-1}, 0% HBPS), seguido por CL-Q (4,9 t ha^{-1}, 0% HBPS) y CL+Q (4,6 t ha^{-1}, 0% HBPS) (Figura 1B). Los menores rendimientos promedios se obtuvieron en la temporada 1998/99, debido a la situación de déficit hidrológico (Rouanet *et al.*, 1999a).

Para la absorción de N total por la planta, tanto el análisis dentro de cada temporada (Cuadro 2) como el análisis de contrastes ortogonales (combinación labranza x temporada) (Cuadro 3), indicaron que ésta fue significativamente mayor para CL+Q en 1997/98, y TRAD en 1998/99, tratamientos que a la vez presentaron los mayores rendimientos en grano en la respectiva temporada.

La absorción de Nddf en 1997/98 fue significativamente menor en las plantas en el sistema CL-Q, resultado obtenido en sistemas de producción que manejan residuos sobre o incorporados al suelo, situación que de acuerdo a Aulakh *et al.* (1984), Tomar y Sopper (1981) y Doran (1980), se debe a una pérdida de N disponible debido a inmovilización y desnitrificación. En 1998/99, no se observó una menor absorción del Nddf, para los tratamientos CL+Q y TRAD, contrario al efecto esperado de déficit de lluvias, el que puede afectar tanto la mineralización de la materia orgánica como la absorción de N-fertilizante. De acuerdo a Bashir *et al.* (1997), la planta de trigo experimenta un incremento en la tasa de absorción de Nddf y Ndds una vez presentada la etapa fenológica de encañado y posterior a la aplicación de N. Para la temporada

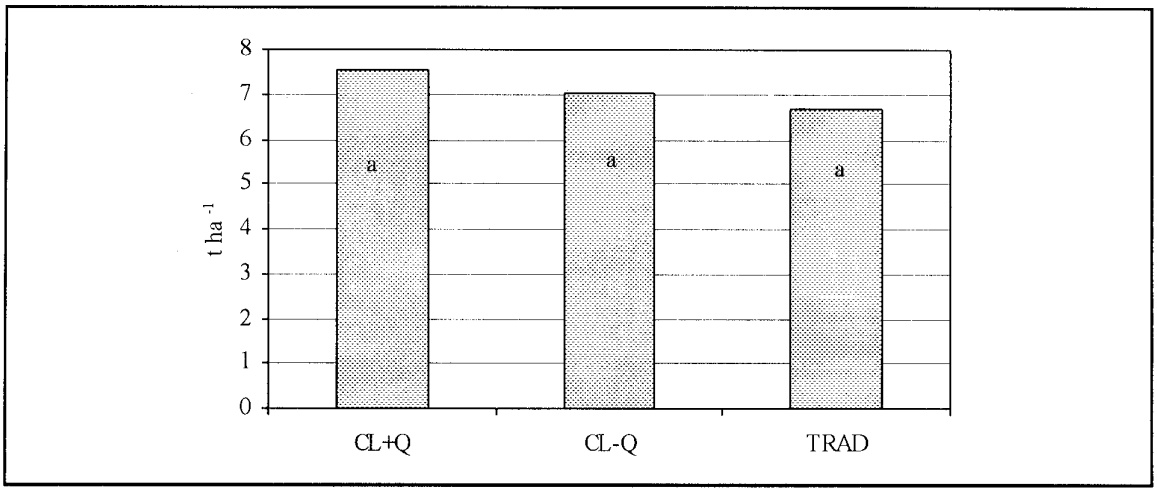

Figura 1A. Rendimiento en grano (0% HBPS) de trigo cv. Dalcahue en tres sistemas de manejo de suelos. Nueva Imperial, 1997/98. Letras iguales señalan rendimiento sin diferencias significativas ($P < 0,05$) según test de Scheffé.
Figure 1A. Grain yeld (0% DWB) of wheat cv. Dalcahue under three soil tillage systems, Nueva Imperial 1997/98.

CL + Q: Cero labranza con quema; CL-Q: Cero labranza sin quema; TRAD: tradicioinal, quema de rastrojos e inversión del suelo.

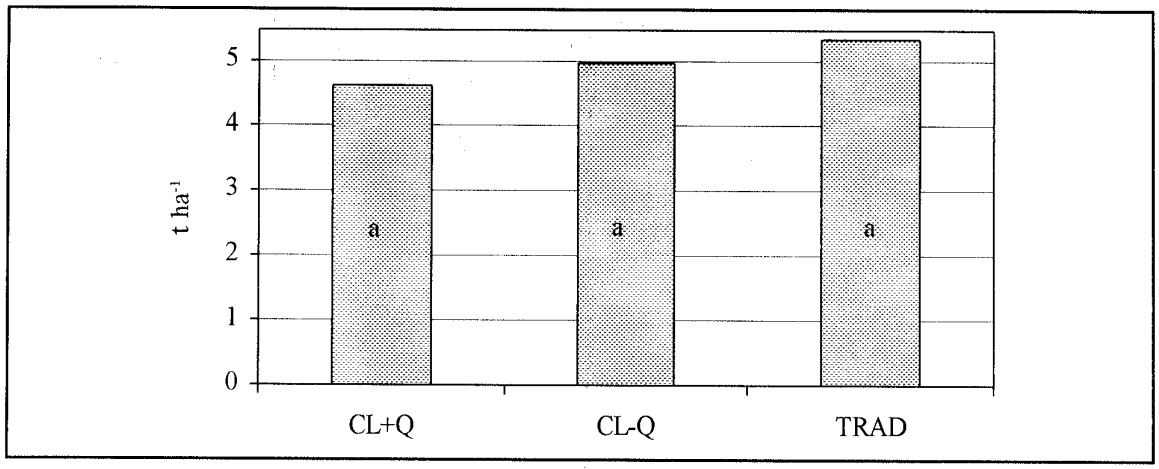

Figura 1B. Rendimiento en grano (0% HBPS) de trigo cv. Dalcahue en tres sistemas de manejo de suelo. Nueva Imperial, 1997/98. Letras iguales señalan rendimiento sin diferencias significativas (P < 0,05) según test de Scheffé.

Figure 1B. Grain yield (0% DWB) of wheat cv. Dalcahue under three soil tillage systems, Nueva Imperial 1998/99.

CL + Q: Cero labranza con quema; CL-Q: Cero labranza sin quema; TRAD: tradicioinal, quema de rastrojos e inversión del suelo.

Cuadro 2. N en la planta de trigo y eficiencia fisiológica de uso de N del cultivo de trigo en tres sistemas de manejo de suelo. Nueva Imperial, 1997/98 y 1998/99

Table 2. N in wheat plants and physiological N use efficiency in wheat with three soil management systems. Nueva Imperial, 1997/98 and 1998/99

Labranza	Nt planta kg ha^{-1}	Nddf kg ha^{-1}	Ndds kg ha^{-1}	EFNt kg kg Nt abs. ha^{-1}	EFNf kg kg ^{15}Nf abs. ha^{-1}
			1997/98		
CL + Q	121 a[1]	53 a	68 a	62,2 ab	142,5 b
CL – Q	102 b	44 c	58 b	68,8 a	159,5 a
TRAD	109 b	47 b	61 b	60,8 b	140,2 b
			1998/99		
CL + Q	112 b	49 b	62	41,5 b	94,0 b
CL – Q	110 b	46 b	63	45,2 a	107,0 a
TRAD	128 a	65 a	62	42,0 b	82,5 b

[1]Letras distintas en las columnas señalan diferencias significativas (P < 0,05) según test de Scheffé.
CL+Q: cero labranza con quema de residuos; CL-Q: cero labranza sin quema de residuos; TRAD: inversión de suelo y quema de residuos; Nddf: N derivado del fertilizante; Ndds: N derivado del suelo; EFNt: eficiencia fisiológica de uso de N total; EFNf: eficiencia fisiológica de uso de N fertilizante; Nt: N total; ^{15}Nf: ^{15}N fertilizante.

1997/1998, a la fecha de encañado (1 de septiembre) se había aplicado la totalidad del N fertilizante, acumulándose una precipitación de 643 mm entre la primera y tercera aplicación de éste (27 de mayo al 20 de agosto), mientras que para 1998/99 a la fecha de encañado (7 septiembre), se había aplicado el 55% del N fertilizante con 379 mm de lluvia en el período 12 de junio al 26 de agosto, entre la primera y última parcialización del N fertilizante. En esta temporada el 45% restante del N fertilizante se aplicó 8 días después del encañado.

Cuadro 3. Medias de contenido de N y de eficiencia fisiológica de uso de N del cultivo de trigo en tres sistemas de manejo de suelo. Análisis combinado, contrastes ortogonales. Nueva Imperial. 1997/98, 1998/99

Table 3. Means of N content and physiological N use efficiency in wheat under three soil tillage systems. Combined analysis, orthogonal contrasts. Nueva Imperial. 1997/98, 1998/99

Labranza x temporada	Nt planta kg ha^{-1}	Nddf kg ha^{-1}	Ndds kg ha^{-1}	EFNt kg kg Nt abs. ha^{-1}	EFNf kg kg ^{15}Nf abs. ha^{-1}
CL + Q'97	121 a[1]	53 a	68,4 a	62,2 a	142,5 ab
CL – Q'97	102 b	44 b	58,2 b	68,8 a	159,5 a
TRAD '97	109 b	47 b	61,5 b	60,8 a	140,2 ab
CL + Q'98	112 b	49 b	62,2 b	41,5 b	94,0 c
CL – Q'98	110 b	46 b	63,2 b	45,2 b	107,0 b
TRAD '98	128 a	65 a	62,5 b	42,0 b	82,5 c

[1] Letras distintas en la columna señalan diferencias significativas ($P < 0,05$) según test de Scheffé.
CL+Q: cero labranza con quema de residuos; CL-Q: cero labranza sin quema de residuos; TRAD: inversión de suelo y quema de residuos: Nddf: N derivado del fertilizante; Ndds: N derivado del suelo; EFNt: eficiencia fisiológica de uso de N total; EFNf: eficiencia fisiológica de uso de N fertilizante; Nt: N total; ^{15}Nf: ^{15}N fertilizante.

En 1997/98, con un mayor contenido de humedad en el suelo, y como fue observado por Pilbeam *et al.* (1993), la tasa de mineralización habría sido mayor a la presentada en 1998/99 desde el inicio del ciclo de crecimiento. El exceso de lluvias entre la primera y tercera aplicación de N fertilizante habría provocado pérdidas por lixiviación tanto de N del suelo como del N aplicado (Powlson *et al.*, 1986). En 1998/99, en un suelo con menor contenido relativo de agua, el cultivo de trigo pudo absorber más N por presentarse un menor riesgo de lixiviación (Powlson *et al.*, 1986).

Por otra parte y de acuerdo a Rao *et al.* (1992) y a Hart *et al.* (1986), el efecto de la Interacción de Nitrógeno Agregado (ANI), que puede aumentar la absorción de N inorgánico del suelo al agregarse fertilizante marcado, podría explicar la mayor absorción de N. Este efecto ANI tiene mayor probabilidad de presentarse en suelos con altos contenidos de materia orgánica en descomposición, situación encontrada en el sistema TRAD. La inversión del suelo en este sistema de manejo habría promovido una mayor tasa de mineralización de N nativo a inicios de la temporada de crecimiento (mayo). Sin embargo, de acuerdo a Jenkison *et al.* (1985), esta interacción entre el ^{15}N agregado y el N nativo del suelo tiene más probabilidad de presentarse cuando el fertilizante marcado es mezclado en el suelo con anterioridad a la siembra, lo que no ocurrió en estos experimentos. Aunque aparentes efectos ANI pueden complicar el análisis de los resultados, en este estudio se muestra con ^{15}N lo que realmente está sucediendo con el fertilizante en la planta.

Dentro de la temporada 1997/98, el trigo, en los tratamientos que no contemplan inversión de suelo mostró la mayor EFNt. Por su parte, en el tratamiento CL-Q en 1998/99 el cultivo mostró una EFNt mayor que en los otros sistemas de manejo de suelo (Cuadro 2). En el análisis de efectos combinados de sistema de labranza x temporada (Cuadro 3) se obtiene también que la mayor absorción de ^{15}N-fertilizante (Nddf) por el cultivo de trigo, se presentó en el sistema TRAD en 1998/99, seguido por CL+Q en 1997/98. El resto de las combinaciones no presentaron diferencias significativas entre sí. Sólo para CL+Q en 1997/98 se observó un Ndds significativamente mayor y diferente al resto de las combinaciones manejo x temporada. Esta característica de estabilidad para la absorción

de N total, explicada a través de su componente Ndds en el cv. Dalcahue, podría estar indicando una baja interacción genotipo x temporada.

Los valores de producción de grano por unidad de N en la planta (EFNt), fueron mayores en 1997/98 a los encontrados por Rouanet (1994), determinados por el método de la diferencia en un suelo Andisol, pero fueron menores en 1998/99. Éste determinó que a una dosis de 160 kg ha^{-1} de N-fertilizante aplicado a un trigo alternativo, una absorción de N total por la planta de 141 kg ha^{-1} y una eficiencia fisiológica de 52,5 kg grano/kg N total absorbido. Por su parte, Huggins y Pan (1993), en un suelo Argialboll con un contenido de N total en la planta de trigo de primavera de 153 y 123 kg ha^{-1}, calcularon una EFNt de 38,3 y 34,6 para los sistemas tradicional y cero labranza, respectivamente. Kanampiu *et al.* (1997), en un suelo Paleoustoll con variedades invernales de trigo con una absorción de 88 kg de N total ha^{-1}, encontraron una EFNt entre 31 a 38 kg grano/kg N total en la planta, con 160 kg ha^{-1} de N-fertilizante aplicado. Todos los autores señalados encontraron, además, diferencias entre variedades en la eficiencia fisiológica de uso de N fertilizante.

En todos los sistemas de manejo de suelo, la EFNt del cultivo de trigo en 1997/98 fue mayor a la obtenida en 1998/99, explicada por el menor rendimiento en grano relativo a cantidades similares o mayores de absorción de N total por la planta en esta última temporada (Cuadro 3). Dado que el contenido de agua en el suelo del sitio del ensayo alcanzó 30% de la humedad aprovechable desde fines de octubre en adelante (Rouanet *et al.*, 1999a), se habrían afectado negativamente los procesos de translocación de fotosintatos y N al grano (crecimiento del mismo). La respuesta anterior en este componente de rendimiento es una reducción en su peso final, que como una variable anexa determinada en este estudio, mostró una reducción de 44 mg/grano en 1997 a 28 mg/grano en 1998/99, similar para todos los tratamientos.

La EFNt representa el efecto tanto genotípico como ambiental sobre la planta (interacción temporada x labranza), y el manejo agronómico. Sin embargo, ignora el abastecimiento de nutrientes de diferentes fuentes y el reciclaje del mismo dentro de los límites del sistema productivo (Simonis, 1988). Para tal efecto se calcularon los valores de la EFNf, que permite separar el ^{15}N fertilizante (Nddf) del Ndds encontrado en la planta. Dado que el índice EFNf se obtiene al calcular la relación entre los kilogramos de grano producidos con los kilogramos de Nddf en la planta exclusivamente, sus valores son mayores comparados a los obtenidos en el índice EFNt. La eficiencia fisiológica de uso de N (EFNf) fue mayor para todos los tratamientos en 1997/98 comparado con los obtenidos en 1998/99, indicando un efecto de la menor caída pluviométrica y su efecto en el balance hidrológico.

La EFNf del cultivo de trigo presentó valores significativamente mayores y diferentes en CL-Q en cada temporada (Cuadro 2). En el análisis combinado se observó una mayor EFNf en el sistema CL-Q que en los sistemas TRAD y CL+Q para 1997/98. En la temporada 1998/99, la EFNf para CL-Q fue significativamente mayor que en los sistemas que eliminan los residuos mediante el uso del fuego (Cuadro 3). Los valores mayores de EFNf que presentó el cultivo de trigo en el sistema CL-Q dentro de cada temporada, en conjunto con valores menores de N total absorbido en relación al sistema TRAD, estaría significando que el cultivo en este sistema de manejo de suelo fue más eficiente en la transformación interna de N absorbido proveniente del fertilizante.

La diferencia significativa que presentó el índice de eficiencia fisiológica de uso de N por el cultivo de trigo en un suelo Ultisol para CL-Q, puede deberse a cambios en las tasas de los procesos de mineralización-inmovilización al mantener residuos sobre el suelo o, con resultados impredecibles en el crecimiento y productividad de los cultivos según lo reporta Urquiaga (1998). De acuerdo a Kanampiu *et al.* (1997), una

mayor relación de unidad de grano producida por unidad de N fertilizante absorbido, representa una mayor efectividad de translocación, asimilación y redistribución de N al grano en crecimiento.

En la literatura especializada se recomienda que la interpretación de los resultados sea apoyada por otros índices de transformación de N en el suelo, ya que la reacción de mineralización-inmovilización puede conducir a la estimación de eficiencias de uso de N menores a las calculadas por el método de la diferencia (Rao *et al.*, 1992), lo que no se observó en este estudio. Por otra parte, existe extensa información sobre eficiencia de uso de N global (Bock, 1984), índice evaluado de acuerdo a la interpretación de cada investigador. Los estudios de Reed *et al.* (1980), Moll *et al.* (1982), Bock (1984), y Craswell y Godwin (1984) identificaron que la eficiencia de uso de N global se explica por la interacción de los componentes de eficiencia de recuperación de N, eficiencia fisiológica de uso de N. Teyker *et al.* (1989), indicaron, además, que la contribución relativa de esta última es de regulación genotípica. Por tanto, la eficiencia fisiológica de uso de N debe ser considerada como un componente de la eficiencia global, que considera la reacción de la planta en estudios de balance de N.

Debido a lo anterior, la producción de este cereal con un aumento en la eficiencia de utilización del N fertilizante agregado, medida como eficiencia fisiológica de uso de N, podría ser más eficiente en un período de 4 a 5 años desde el inicio del manejo conservacionista en la situación de suelos Ultisoles del secano interior de la IX Región. Subsecuentemente, el productor podría alterar positivamente la relación costo/beneficio de su sistema de producción, ya que el N fertilizante representa entre 35 y 39% de los costos de producción.

Contabilizando la cantidad de N fertilizante que se recupera en la planta, en conjunto con las determinaciones del ^{15}N agregado que permanece en el perfil del suelo a la fecha de cosecha del cultivo de trigo (Rouanet *et al.*, 1999b), es posible demostrar que en este estudio se perdió o no se recuperó del sistema suelo-planta 12 a 21% del N fertilizante agregado.

CONCLUSIONES

El índice EFNt mostró sensibilidad al efecto del ambiente (interacción temporada x labranza), y al manejo agronómico, permitiendo definir situaciones para una mayor eficiencia de uso del nitrógeno tanto del suelo como del fertilizante agregado.

El índice EFNf, obtenido mediante el uso de las técnicas isotópicas, discrimina la información sobre la eficiencia de uso de N aplicado como fertilizante. Este índice, no calculado ni presentado por investigaciones anteriores, presenta una fuerte dependencia del régimen de lluvias y varía positivamente en situación de manejo de suelo con residuos sobre la superficie.

Aunque aparentes efectos ANI presentados en este estudio pueden alterar la interpretación de los resultados, el uso de ^{15}N permite conocer lo que está sucediendo realmente con el fertilizante en la planta.

Esta información debe ser reforzada con determinaciones del efecto genotipo, parcialización y fuentes de N, dado que el suelo puede modificar la dinámica del uso de N por el cultivo de trigo.

Se justifica más investigación en torno al tema de la eficiencia de uso de N fertilizante por la planta y su destino en el suelo.

LITERATURA CITADA

Al-Darby, A.M., and B. Lowery. 1986. Evaluation of corn growth and productivity with three conservation tillage systems. Agron. J. 78:901-907.

Aulakh, M.S., D.A. Rennie, and E.A. Paul. 1984. The influence of plant residues on denitrification rates in conventional and zero till soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 48:790-794.

Bashir, R., R.J. Norman, R.K. Bacon, and B.R. Wells. 1997. Accumulation and redistribution for fertilizer nitrogen-15 in soft red winter wheat. Soil Sci. Soc. Am. J. 61:1407-1412.

Bock, B.R. 1984. Efficient use of nitrogen in cropping systems. p. 273-294. *In* R.D. Hauck (ed.) Nitrogen in crop production. ASA, CSSA and SSSA, Madison, Wisconsin, USA.

Craswell, E.T., and D.C. Godwin. 1984. The efficiency of nitrogen fertilizer applied to cereals in different climates. Vol 1. p. 1-55. *In* Tinker, P.B. and A. Lauchli (eds.). Advances in plant nutrition. Praeger Scientific, New York, USA.

Davis, T.J., and I.A. Schirmir. 1987. Sustainability issues in agricultural development. 7 p. Work Paper. Rural Development. World Bank, Washington D.C., USA.

Doran, J.W. 1980. Soil microbial changes associated with reduced tillage. Soil. Sci. Soc. Am. J. 44:765-771.

Evans, L.T. 1980. The natural history of crop yield. Am. Sci. 68:388-397.

Godoy, A., y J.L. Rouanet. 1999. Antecedentes económicos de producción de trigo en sistemas de manejo de suelo alternativos. Serie Acta N° 3. p. 31-40. *In* J.L. Rouanet (ed.) Agricultura conservacionista en cultivos anuales, agricultura de futuro. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Carillanca, Temuco, Chile.

Hart, P.B.S., J.H. Bayner, and D.S. Jenkinson. 1986. Influence of pool substitution on the interpretation of fertilizer experiments with ^{15}N. J. of Soil Science 37:389-403.

Hauck, R.D., and J.M. Bremner. 1976. Use of tracers for soil and fertilizer nitrogen research. Adv. Agron. 28:219-266.

Huggins, D.R., and W. Pan. 1993. Nitrogen efficiency component analysis: an evaluation of cropping system differences in productivity. Agron. J. 85:898-905.

Jenkinson, D.S., R.H. Fox, and J.H. Rayber. 1985. Interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen-the so called "priming" effect. J. Soil Sci. 36:425-444.

Kanampiu, F.K., W. Raun, and G.V. Johnson. 1997. Effect of nitrogen rate on plant nitrogen loss in winter wheat varieties. J. Plant Nutr. 20:389-404.

Moll, R.H., E.J. Kamprath, and W.A.Jackson. 1982. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. Agron. J. 74:562-564.

Olson, R.V., and C.W. Swallow. 1984. Fate of labeled nitrogen fertilizer applied to winter wheat for five years. Soil Sci. Soc. Am. J. 48:583-586.

Pierce, F.J., and C.W. Rice. 1988. Crop rotations and its impact on efficiency of water and nitrogen use. p. 21-42. *In* W.L. Hargrove (ed.) Cropping strategies for efficient use of water and nitrogen. ASA Spec. Publ. 51. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, Wisconsin, USA.

Pilbeam, C.J., T. Mahapatra, and M. Wood. 1993. Soil matric potential effects on gross rates of nitrogen mineralization in an Orthic Ferralsol from Kenya. Soil Biol. Biochem 25:1409-1413.

Powlson, D.S., P.B.S. Hart, G. Pruden, and D.S. Jenkinson. 1986. Recovery of ^{15}N-labelled fertilizer applied in autumn to winter wheat at four sites in Eastern England. J. Agric. Sci. (Cambridge) 107:611-620.

Powlson, D.S., P.R. Poulton, N.E. Moller, M.H. Hewitt, A. Penny, and D.S. Jenkinson. 1989. Uptake of foliar-applied urea by winter wheat. The influence of application time and the use of a new ^{15}N technique. J. Sci. Food Agric. 48:429-440.

Rao, A.C.S., J.J. Smith, J.F. Parr, and R.I. Papendick. 1992. Considerations in estimating nitrogen recovery efficiency by the difference and isotopic dilution methods. Fert. Res. 33:209-217.

Rao, S., and T. Dao. 1996. Nitrogen placement and tillage effects on dry matter and nitrogen accumulation and redistribution in winter wheat. Agron. J. 88:365-371.

Reed, A.J., F.E. Below, and R.H. Hageman. 1980. Grain protein accumulation and the relationship between leaf nitrate reductase and protease activities during grain development in maize (*Zea mays* L.). I. Variation between genotypes. Plant Physiol. 66:164-170.

Rennie, D.A., and E.A. Paul. 1971. Isotope methodology and techniques in soil-plant nutrition and plant physiology. Institute of Pedology Bulletin 76:117-121,128-130. University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.

Rouanet, J.L. 1994. Eficiencia fisiológica de uso de nitrógeno por cultivos anuales en futura agricultura sustentable. Agricultura Técnica (Chile) 54:169-179.

Rouanet, J.L., I. Pino, A.M. Parada, H. Uribe, A. Nario, A. Godoy, A. Mera, y A. Montenegro. 1999a. Aplicaciones de las técnicas isotópicas con ^{15}N en el estudio de la recuperación del nitrógeno fertilizante en el suelo y su absorción por la planta en sistemas de producción de trigo. Nucleotécnica 19:33-43.

Rouanet, J.L., I. Pino, A.M. Parada, S. Urquiaga, A. Montenegro, y L. Barrientos. 1999b. Recuperación de ^{15}N fertilizante por el cultivo de trigo y N-fertilizante residual en el suelo en tres sistemas de manejo en un Ultisol de la IX Región. (CD-ROM) (Resumen). *In* I. Salazar (ed.) 14° Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, 50° Congreso de la Sociedad Agronómica de Chile, 9° Congreso de la Sociedad Chilena de la Ciencias del Suelo. 8-12 noviembre. Pucón, Chile.

Simonis, A.D. 1988. Studies on nitrogen use efficiency in cereals. p. 110-124. *In* Jenkinson, D.S. and K.A. Smith (eds.). Proceedings Symposium Nitrogen Efficiency in Agricultural Soils and the Efficient Use of Fertilizer Nitrogen. Edinburg, Scotland, 16-18 September, 1987. Elsevier Applied Science Publishers, Edinburg, United Kingdom.

Teyker, R.H., R.H. Moll, and W.A. Jackson. 1989. Divergent selection among maize seedlings for nitrate uptake. Crop Sci. 29:879-884.

Tomar, J.S., and B.J. Sopper. 1981. Fate of tagged urea N in the field with different methods of N and organic matter placement. Agron. J. 73:981-985.

Urquiaga, S., G.Cadish, B.J.R Alves, R.M. Boddey, and K.E.Giller. 1998. Influence of decomposition of tropical forage species on the availability of soil nitrogen. Soil Biol. Biochem. 30:2099-2106.

Urquiaga, S., y F. Zapata. 2000. Manejo eficiente de la fertilización nitrogenada de cultivos anuales en América Latina y el Caribe. 110 p. EMBRAPA, Porto Alegre, Brasil.

Zadok, J.C., T.T.Chang, and C.F. Zonzak. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. Weed Res. 14:415-421.

Zapata, F. 1990. Técnicas isotópicas en estudios sobre la fertilidad del suelo y la nutrición de las plantas. p. 79-171. *In* G. Hardson (ed.) Empleo de técnicas nucleares en los estudios de la relación suelo-planta. IAEA, Viena, Austria.

Zapata F., and O. Van Cleemput. 1986a. Fertilizer nitrogen recovery and biological nitrogen fixation in fababean-sugar beet and spring wheat-fababean cropping sequences. Fert. Res. 8:263-268.

Zapata, F., and O. Van Cleemput. 1986b. Recovery of ^{15}N-labelled fertilizer by sugar beet-spring wheat and winter rye-sugar beet cropping sequences. Fert. Res. 8:269-278.