

Dinámica del nitrógeno en la rotación cultivo – pastura bajo laboreo convencional y siembra directa

por Jorge Sawchik *

Introducción

La introducción de la siembra directa en los sistemas de producción es el hecho más relevante de la última década con relación al manejo de los suelos. Esta introduce al sistema actual una serie de ventajas: reducción de las pérdidas de suelo por erosión, mayor flexibilidad y aprovechamiento de las oportunidades de siembra, una mayor intensidad de uso del suelo, aprovechamiento de zonas marginales, entre otras.

En los países del Cono Sur existe una creciente adopción de la siembra directa en los diferentes sistemas de producción. Su utilización se ha extendido en forma mayoritaria en los sistemas de rotación de cultivos continuos para grano.

Los esquemas de producción mixtos de la región son más escasos y tienen como pilar una rotación de cultivos anuales forrajeros o para grano y pasturas de especies variadas, de duración anual o pluriannual, con un fuerte componente de leguminosas. En este caso la adopción de la siembra directa es más lenta.

El nitrógeno (N) es el nutriente más importante para la concreción de altos rendimientos en los cultivos. En los sistemas mixtos en particular, la entrada de N vía fijación simbiótica por las leguminosas es relevante, representando una fuente de suministro de N de magnitud para los cultivos posteriores.

La información sobre la dinámica de N bajo estos sistemas ha sido generada mayoritariamente bajo condiciones de laboreo convencional.

El objetivo del presente artículo es revisar la información existente en algunos aspectos de la dinámica de N bajo estos sistemas y los cambios esperados con la inserción de la siembra directa.

Entradas de nitrógeno vía fijación simbiótica

En los sistemas mixtos que rotan cultivos con pasturas que incluyen leguminosas existen tres vías importantes de entrada de N: los residuos de los cultivos, los fertilizantes nitrogenados y la fijación de N atmosférico por la asociación Rhizobium – leguminosa.

* Ing. Agr., MSc., Manejo y Fertilidad de Suelos, INIA La Estanzuela, Uruguay. E-mail: sawchik@inia.org.uy

La cantidad de N fijado por una leguminosa en un determinado período va a depender de su productividad, del contenido de N del forraje y de la proporción del N que se derivó de la atmósfera por acción de la simbiosis, ya que la leguminosa también puede tomar N del suelo.

Existe una importante variación estacional en la fijación biológica del nitrógeno (FBN), presentando valores máximos en invierno y mínimos durante el verano.

En mezclas forrajeras de clima templado, la disponibilidad de N del suelo es el factor que más afecta la simbiosis Rhizobium – leguminosa (García et al., 1994). Durante el invierno, cuando la tasa de mineralización de N del suelo está limitada por las bajas temperaturas y por lo tanto la cantidad de N mineral presente en el suelo es baja, el porcentaje de N derivado de la fijación es alto llegando a valores cercanos al 100 por ciento.

Mallarino y Wedin (1990) y otros autores determinaron que la mayor concentración de N mineral (amonio y nitrato) durante los meses de verano resultaba en porcentajes menores de N derivado de la simbiosis Rhizobium - leguminosa.

García et al. (1994) midieron por técnicas isotópicas para las condiciones de Uruguay, las cantidades de N fijado por las cuatro especies de leguminosas más utilizadas: Trébol blanco, Lotus, Trébol rojo y Alfalfa (Cuadro 1). Los autores concluyeron que a excepción del verano las leguminosas obtienen un 90 % del N de la atmósfera, valor similar al promedio para dos años reportado por Danso et al. (1991) de 88 y 91 % de N proveniente de la fijación para Trébol blanco y *Lotus corniculatus* respectivamente. Los autores definen el término eficiencia de la fijación como la relación kg de N fijado/t MS de leguminosa.

Cuadro 1. Estimaciones de nitrógeno fijado (°) para los rendimientos promedio de forraje de 2° año (°) de diferentes leguminosas en Uruguay.

Especie	Forraje MS t/ha	N fijado kg/ha	Kg N/t MS leg.
Trébol blanco	7.5	229	31
Lotus	8.3	226	27
Trébol rojo	8.8	308	35
Alfalfa	11.6	366	32

(°) Estimaciones de los parámetros simbióticos para *T. blanco* y *Lotus*, promedio de 5 experimentos en el período 1984-1990; para *T. rojo* y *Alfalfa*, datos de 1 experimento.

(°) Promedio para el período 1976 – 1992.
Adaptado de García et al.(1994).

A pesar de las diferencias de productividad entre especies, puede considerarse que en promedio, por cada tonelada de MS de leguminosa producida, se fijan alrededor de 30 kg de nitrógeno.

En estimaciones indirectas realizadas a partir de un experimento de largo plazo que incluye rotaciones de cultivos y pasturas, Díaz-Rosselló (1992a) estimó una entrada al suelo de 40 kg de N por tonelada de MS de leguminosa producida. Resulta claro entonces que la entrada de N a los sistemas por esta vía es muy importante.

Aquellas prácticas de manejo que maximicen la producción y persistencia de las leguminosas como la fertilización fosfatada, el manejo adecuado de la especie, y la

correcta elección de las variedades entre otras, tendrán un impacto positivo sobre la entrada de N en los sistemas mixtos.

Efecto de la inclusión de pasturas en el C orgánico y N total

La materia orgánica del suelo es un componente esencial clave dentro de los sistemas productivos por su influencia en propiedades químicas, físicas y biológicas que afectan la productividad de los cultivos. Las diferentes prácticas de manejo del suelo y de los cultivos pueden alterar esta propiedad.

Teniendo en cuenta la importancia de las entradas de N a los sistemas mixtos por la vía reseñada resulta relevante conocer el impacto de las pasturas sobre indicadores de productividad y calidad de suelos como la materia orgánica.

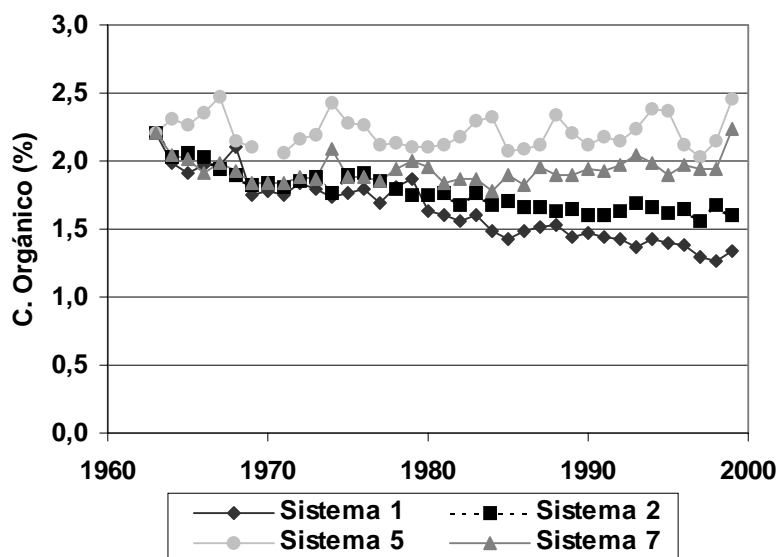
Carbono orgánico

En un experimento de largo plazo iniciado en 1963 en la Estación Experimental La Estanzuela en Uruguay, donde se contrastan diferentes intensidades de uso del suelo, la inclusión o no de pasturas y la duración de las mismas bajo laboreo convencional, se evaluó el contenido de C orgánico como un indicador tradicional de uso y manejo del suelo.

Cabe acotar que este sitio estuvo durante muchos años bajo cultivo continuo sin utilización de medidas de conservación de suelos, previo a la instalación del experimento.

A su vez, las parcelas son de gran escala (200m x 25m) y se ubican a lo largo de toda la pendiente. De este modo las pérdidas de suelo por erosión hídrica se expresan igual que en los predios de producción.

En la Figura 1 se presenta la evolución del C orgánico para algunos tratamientos seleccionados del experimento. Los sistemas 1 y 2 representan situaciones de agricultura continua sin y con agregado de fertilizante nitrogenado y fosfatado respectivamente,



desde 1963. El sistema 5 es una rotación de tres años de cultivos y tres de pasturas con agregado de fertilizante. En este caso la pastura es una mezcla de Festuca, Trébol blanco y Lotus. Por su parte, el sistema 7 es agricultura continua en rotación con una leguminosa bianual, Trébol rojo. Cabe acotar que los sistemas 5 y 7 no tienen pastoreo animal y el manejo del forraje se realiza mediante corte y devolución.

Figura 1. Evolución del C orgánico bajo diferentes rotaciones en INIA La Estanzuela (Sistema 1 = agricultura continua s/fert.; Sistema 2 = agricultura continua c/fert.; Sistema 5 = rotación cultivo-pastura; Sistema 7 = agricultura continua intercalada con Trébol rojo).

Los sistemas de cultivo continuo (1 y 2) muestran una caída sostenida del contenido de C orgánico con respecto al valor original consistente con la reportada por otros autores. En estos sistemas, para el período analizado (1963-99), el contenido de C orgánico se redujo en promedio un 33 % con respecto al valor original, un 5 % mayor al reportado por Díaz-Roselló (1992b) para el período 1963-92.

El bajo retorno de residuos asociado a la baja productividad de los cultivos, la alta intensidad del laboreo, sumado al efecto de la erosión parecen ser factores claves en los resultados obtenidos.

En los sistemas que rotan con pasturas los valores se mantienen cerca de los niveles medidos al inicio del experimento. Sin embargo, se producen ciclos de ganancia y pérdidas de C que coinciden con las etapas de pasturas y cultivos respectivamente. El autor sugiere la presencia de un pool más lábil de C por la incorporación de las pasturas, que se pierde a una tasa mayor en la etapa de cultivos que en los sistemas bajo cultivo continuo.

Para condiciones climáticas más frías como las de Balcarce, en un experimento iniciado en 1976, se verificó un continuo descenso en el C orgánico bajo cultivo continuo. En los tratamientos donde se incluían pasturas, la producción de biomasa y raíces durante esta etapa aumentaba rápidamente el contenido de materia orgánica. Los incrementos en el C orgánico del suelo fueron mayores después de pasturas de larga duración (Studdert et al., 1997).

Nitrógeno total

El mismo comportamiento se observa en el experimento iniciado en 1963 en Uruguay con respecto al contenido de N total del suelo para el mismo periodo. Los sistemas de cultivo continuo perdieron en 36 años (1963-99) un 22 y 31 % del contenido original de N total de la capa arable en los tratamientos con y sin agregado de fertilizantes respectivamente.

En los sistemas que rotan con pasturas el comportamiento de esta variable es cíclico, pues en la fase de pasturas se produce un incremento del contenido de N total. Las entradas y la magnitud de este incremento dependen de la cantidad de N fijado en esta etapa o sea está estrechamente relacionado con la productividad y persistencia de las leguminosas componentes de la mezcla.

Una vez iniciada la fase de cultivos, si ésta se realiza con laboreo convencional, se producen pérdidas de N por efecto de la oxidación de la materia orgánica, además de procesos erosivos.

Díaz-Roselló (1992a) determinó para los sistemas que rotan cultivos y pasturas una entrada promedio de 500 kg de N/ha (en los 20 cm de la capa arable) durante la fase de pasturas. En la etapa de cultivos por su parte, salen del sistema en promedio unos 650 kg/ha de N. Hossain et al. (1996) para condiciones de Australia reportan un incremento de 780 kg de N/ha luego de una fase de cuatro años de una pastura mezcla de gramíneas y leguminosas.

En la Figura 2 se presenta la evolución en el contenido de N total promedio para los últimos tres ciclos completos de la rotación (tres años de cultivo y tres de pasturas en cada ciclo).

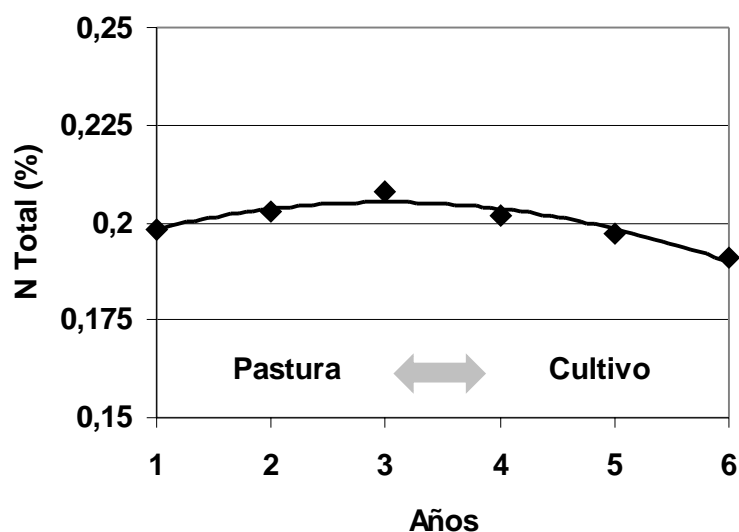


Figura 2. Evolución del contenido de N total promedio para los 3 últimos ciclos de rotación de cultivos y pasturas en Experimento de Rotaciones en INIA La Estanzuela.

En este experimento, las pérdidas por erosión están maximizadas, debido a las prácticas de manejo del suelo empleadas. Por lo tanto, la erosión selectiva presumiblemente es una vía de pérdida significativa de N.

Si se emplearan prácticas de manejo intermedias hacia la siembra directa como el acortamiento de los períodos de barbecho, la sustitución de laboreos secundarios por el uso de herbicidas, se disminuirían las pérdidas de N en la fase de cultivos. Esto permitiría alargar la fase de cultivos una vez roturada la pastura.

Studdert et al., (1997), para suelos de Balcarce con pendientes muy leves (0,5 %) determinaron que la combinación de un ciclo de tres años de pastura y siete de cultivos lograba mantener al sistema en equilibrio.

Cabe acotar que en este caso las tasas de mineralización de la materia orgánica se ven retardadas por condiciones más frías que las de Uruguay.

Residualidad del nitrógeno dejado por las pasturas

La residualidad del N dejado por las pasturas en estos sistemas, una vez iniciada la etapa de cultivos, con laboreo convencional, determina necesidades crecientes de fertilizante nitrogenado a medida que nos alejamos del tiempo de roturación de la pastura.

Esto se refleja en la cantidad de fertilizante nitrogenado que debe utilizarse en la fase de cultivos. Así, García Lamothe (1994), trabajando en ensayos de respuesta al agregado de N en el cultivo de trigo bajo laboreo convencional determinó dosis óptimas sustancialmente menores en trigos sembrados enseguida de la roturación de la pastura (Cuadro 2).

Cuadro 2. Dosis de N para el óptimo económico (DOE), e incrementos de rendimiento en trigo según el uso anterior de la chacra.

Historia de chacra	Testigo sin N	DOE kg/ha	% de incremento	CV (%) DOE	N
Pastura recién roturada	3.950	26	4.4	63	14
2º y 3er post – pastura	3.000	152	55	28	10
Pastura de gramíneas	2.380	176	95	16	4

Adaptado de García Lamothe (1994).

Se observa que en situaciones de praderas de larga duración recién roturadas, el ahorro en fertilizante nitrogenado así como los mayores potenciales de rendimiento del cultivo de trigo sin fertilizar puede ser importante. En este caso sin embargo, se observa un mayor coeficiente de variación en las DOE probablemente atribuible al tipo y calidad de la pastura incorporada al suelo.

Cabe acotar que en esta serie de experimentos, las situaciones de 2º y 3er cultivo post-pastura generalmente tuvieron tiempos bajo barbecho largos especialmente en parte del verano y otoño. Este período coincide con las mayores tasas de mineralización de N del suelo, por lo que el N mineral producido en esta etapa no fue aprovechado por ningún cultivo y pudo estar sometido a procesos de pérdida. Esto explicaría el rápido incremento de la DOE ya en el segundo año de roturada la pastura.

Cuando la pastura fue exclusivamente a base de gramíneas, si bien las condiciones físicas del suelo fueron muy buenas para el desarrollo de los cultivos, pudo ocurrir un efecto de inmovilización de N importante, producto de la calidad de los residuos incorporados, lo que explica los bajos rendimientos de los tratamientos testigo sin agregado de N.

Basada en estos experimentos esta autora estimó que la capacidad de suministro de N para el cultivo de trigo en los sistemas mixtos de producción en el Uruguay puede variar entre 25-40 kg de N/ha para chacras viejas (con 3 cultivos al menos), y 190 kg de N/ha cuando el cultivo anterior es una leguminosa forrajera de buena productividad y persistencia. Los rendimientos de los tratamientos testigo en esta serie de experimentos oscilaron entre 1,8 y 4,9 t / ha, lo que demuestra la variación que genera el manejo anterior del suelo en la capacidad de suministro de N (García Lamothe, 1998).

Por su parte, Baethgen (1992) estimó que el equivalente fertilizante de 10 suelos del Uruguay variaba entre 40 y 120 kg de N/ha para un ciclo de cultivo de cebada. Este cultivo se siembra en Uruguay generalmente en suelos con menores capacidades de suministro de N, para evitar los excesos de este nutriente en la pérdida de calidad del grano.

Como se mencionó previamente, la duración de la pastura tiene un efecto directo sobre la residualidad del N para los cultivos siguientes. Martino et al. (1986b), con cultivos de trigo posteriores estimaron un suministro de N más largo y estable en el tiempo, con pasturas de cuatro años de duración. Sin embargo, los autores remarcan la baja eficiencia de uso del N dejado por las pasturas, coincidente con lo que sugiere Díaz (1992a). Esto pudo estar asociado a períodos de barbecho largos dados por la sucesión trigo – trigo.

Los resultados confirman los obtenidos en Australia por Holford (1980) en donde la residualidad de N para los cultivos era más duradera en pasturas de alfalfa de tres años y medio que en aquéllas de un año y medio de edad. En promedio entre 40 y 50 kg de N/ha/año de la alfalfa fueron contribuidos a cultivos de trigo posteriores.

Abundante literatura internacional refuerza el efecto que tienen pasturas de buena calidad, en términos de presencia de leguminosas, sobre el ahorro de fertilizante nitrogenado para el cultivo siguiente. Se presume que en cultivos de verano las economías pueden ser más importantes debido a las mejores condiciones de mineralización del N orgánico. En la zona del cinturón maicero americano, Morris et al. (1993) encontraron que para maíces de alto potencial de rendimiento, la dosis óptima promedio luego de alfalfa era de solamente 10 kg/ha de N.

Destino del nitrógeno del residuo de leguminosas

Resulta clara a la luz de los resultados presentados, la contribución positiva de las leguminosas en términos de ahorro de fertilizante nitrogenado para los cultivos. Por diversas metodologías, se ha tratado de estudiar el destino del N del residuo de leguminosas en el sistema suelo – planta.

Evaluaciones con residuos marcados con N¹⁵

Uno de los enfoques para estudiar la residualidad del N proveniente de las leguminosas ha sido el uso de residuos marcados o enriquecidos con N¹⁵.

Crozier et al (1998) determinaron el destino de fertilizantes nitrogenados y residuos de leguminosas marcados en sistemas de producción de maíz. En este estudio un 8 y 3 % del N de la leguminosa fueron recuperados por el 1er y 2o cultivo de maíz respectivamente.

Harris y Hesterman (1990) reportan valores promedio de recuperación de N marcado de residuos de alfalfa por un cultivo de maíz de 21 %. Los autores señalan que la recuperación fue más alta en un suelo con bajos tenores de N total y menores contenidos de C y N en la biomasa microbiana. Esto parece ser debido a una menor dilución del N¹⁵ en el pool de N del suelo en la situación más degradada.

La inmovilización del N marcado del residuo fresco por la biomasa microbiana y su sustitución por N del pool nativo probablemente expliquen la baja recuperación de N¹⁵ por la planta como sucede en otros estudios similares (Ladd y Amato, 1986). Crozier et al., (1994) sugieren que el mayor impacto en la incorporación de residuos de leguminosas es sobre la acumulación de N orgánico y de N potencialmente mineralizable.

En general la recuperación de N proveniente del fertilizante es mayor que la proveniente de los residuos de leguminosa. Harris et al., (1994), basados en un sumario de experimentos utilizando residuos de leguminosas marcados concluyen que: a) menos de 30 % del N de los residuos de leguminosas fue recuperado por el cultivo siguiente, b) grandes cantidades del N proveniente de las leguminosas fueron retenidas en el suelo como N orgánico, c) la recuperación total del N de las leguminosas osciló entre un 70-90 % en el cultivo y el suelo luego de 1 año, d) menos de 5 % del N de la leguminosa fue recuperado por un 2º cultivo.

Estos mismos autores determinaron la recuperación de N por un cultivo de cebada con trébol rojo o fertilizante nitrogenado marcado. En el primer cultivo se recuperó un 40 % del N proveniente del fertilizante y sólo un 17 % del N de la leguminosa. En el suelo en cambio, se recuperó un 47 % del N de la leguminosa y solo un 17 % del fertilizante. En definitiva grandes cantidades de N de las leguminosas son retenidas en el suelo en forma orgánica.

Este autor detectó además que un porcentaje mayor de N estaba en el pool de biomasa microbiana cuando se agregaban residuos de leguminosas. La menor tasa de recuperación por el cultivo del N de residuos de leguminosas parece lógica en la medida que éstos son un sustrato de C fresco para los microorganismos del suelo.

Esta metodología da una medida directa del N contribuido por la leguminosa con las limitantes ya señaladas.

Evaluaciones indirectas

Otra línea más clásica de trabajos estima el potencial de aporte de N en base al equivalente fertilizante (cantidad de N como fertilizante requerido para llegar a un rendimiento equivalente al obtenido después de la leguminosa).

Bruulsema y Christie (1987) utilizando alfalfa y trébol rojo como cultivo previo al maíz encontraron que estas leguminosas aportaron en promedio de 90 - 125 kg de N/ha para el cultivo de maíz. En este caso la recuperación aparente de N fue 70 por ciento del N presente en los residuos de los cultivos anteriores, una cifra bastante mayor que la obtenida con la metodología anteriormente descrita. Aquí sin embargo están confundidos los efectos atribuibles directamente al N y otros indirectos (rotación de cultivos, enfermedades, etc.) que se engloban dentro del concepto "efecto rotación".

En general resulta difícil extrapolar los valores de recuperación de N de residuos marcados de leguminosas a lo que sucede comúnmente en pasturas de larga duración.

Esto es así debido a que en la última situación, entre otros factores, existen varias generaciones de residuos de leguminosas de diferente edad y por lo tanto en diferente estado de descomposición.

McCown et al., (1987) establecieron en base a datos de mineralización de residuos de leguminosas que la mayor contribución de N mineral para los cultivos después de pasturas de larga duración provenía del último año de la pastura. La contribución de N mineral proveniente de los residuos anteriores caía en forma exponencial.

En la región donde se utilizan leguminosas de zona templada, la persistencia del componente leguminosa es un factor crítico. La degradación de las pasturas por la aparición del pasto bermuda, gramón o gramilla *Cynodon dactylon* L. determina una pobre presencia del componente leguminosa en los últimos años de la misma. Esto lleva a que el residuo de la pastura aumente su relación C/N por lo que es muy probable que exista inmovilización neta de N al comienzo de la fase de cultivos, y disminución de la capacidad de aporte de N por las pasturas especialmente para el primer cultivo.

Indicadores de la capacidad de aporte de nitrógeno: efecto de las pasturas

Como ya fue descrito, la rotación de cultivos y pasturas genera cambios y una variación importante en la capacidad de suministro de N para los cultivos. Esta variación es generalmente mayor a la observable bajo condiciones de cultivo continuo. Si bien esto provoca cambios en los contenidos de C y N, éstos ocurren en períodos de tiempo relativamente largos.

Estos indicadores resultan entonces poco sensibles a prácticas puntuales como el efecto de un laboreo o la adición de residuos orgánicos frescos y son de escasa utilidad para predecir la capacidad de suministro de N para un cultivo.

Es necesario contar con herramientas que reflejen en mayor medida los efectos de diferentes prácticas de manejo sobre la capacidad de aporte de N del suelo.

Biomasa microbiana

En este sentido, la biomasa microbiana del suelo ha sido reportada por varios autores como un indicador temprano de las variaciones dentro de la fracción orgánica provocadas por el manejo de suelos (Studdert et al., 1997).

La biomasa microbiana del suelo constituye la parte viva de la materia orgánica. Es una fracción relativamente lábil que puede ser afectada por factores ambientales y de manejo de suelos.

Cuando el N mineral proveniente de la mineralización, amonio o nitrato, es liberado, éste puede ser asimilado por la biomasa microbiana y transformado en compuestos de N orgánico constituyentes de las células de los microorganismos, con una oxidación paralela de sustratos carbonados (Jarvis et al., 1996). Este proceso se conoce con el nombre de inmovilización. Preferentemente la asimilación por los microorganismos se produce desde el pool de amonio. El N inmovilizado puede luego volver a ser mineralizado.

Este continuo pasaje de formas de N orgánico y mineral a través de la biomasa microbiana se conoce con el nombre de MIT (mineralización-inmovilización turnover) y juega un rol fundamental en el reciclaje de nutrientes.

García y Morón (1992) determinaron para el experimento de rotaciones instalado en Uruguay en 1963, el N presente en la biomasa microbiana para diferentes tratamientos. El N en la biomasa representó el 1.35% y 2.1% del N total en los sistemas de agricultura continua y rotación con pasturas respectivamente. El nivel promedio de N en la biomasa microbiana fue de 45 y 88 kg de N/ha para los sistemas comparados.

Basados en esto, los autores calcularon un flujo anual de N de 18 y 35 kg de N/ha/año para los dos sistemas respectivamente, que puede estar disponible para el cultivo o ser retenido o asimilado por la población microbiana y entrar en competencia con la demanda por el cultivo.

Studdert et al. (1997) reportan que el N en la biomasa microbiana (la parte más activa del N orgánico) aumentó un 100 por ciento en un período de tres años de pastura, cayendo luego durante la fase de cultivos.

Indicadores de disponibilidad de nitrógeno a campo: nitratos

La concentración de nitrato en el suelo en determinado momento y para diferentes cultivos es el indicador más empleado para estimar la probabilidad de respuesta al agregado de N. Su mayor utilidad es que refleja el balance de los procesos de mineralización - inmovilización que están ocurriendo en el campo.

La determinación de rangos críticos para separar probabilidades de respuesta o no al agregado de N ha sido definido para el cultivo de trigo bajo laboreo convencional (García Lamothe, 1994) y directa (Bordoli et al., 1999), cebada (Perdomo et al., 1999) y maíz (Perdomo, datos sin publicar). En especial, el manejo de la fertilización de N bajo siembra directa en Uruguay es tratado exhaustivamente por M. Bordoli en este mismo volumen.

Una limitante de este indicador es su variabilidad en el corto plazo debido a condiciones ambientales, y el agregado reciente de residuos, entre otros factores.

Generalmente cuando se laborean pasturas de buena calidad, se produce una importante liberación de N mineral que no siempre sincroniza con las necesidades del cultivo. Si en esta etapa no hay un cultivo creciendo, ese pool de nitrógeno mineral no es utilizado y queda expuesto a pérdidas aún no debidamente cuantificadas en esta región, por lavado o transformación a formas gaseosas o simplemente sufre procesos de inmovilización.

Indicadores de disponibilidad de nitrógeno de laboratorio

Existen otros indicadores de la disponibilidad de nitrógeno que pueden complementar y ayudar a interpretar el significado de un determinado valor de nitrato en el suelo. Carriquiry et al., (1999) evaluaron tres indicadores biológicos de disponibilidad de nitrógeno: a) incubación aeróbica a 15° C de 28 días, b) incubación aeróbica a 30° C de 28 días y c) incubación anaeróbica a 40° C durante siete días o potencial de mineralización de N (PMN) y un método químico, la extracción con KCl 2 M en caliente, para caracterizar la capacidad de aporte de Argiudoles en Uruguay sometidos a manejos contrastantes.

El método de incubación anaeróbica fue el que presentó la mejor asociación con el manejo anterior del suelo. Este fue cuantificado mediante un índice de pasturas que consideraba el porcentaje de tiempo con pasturas en los tres últimos años (Figura 3).

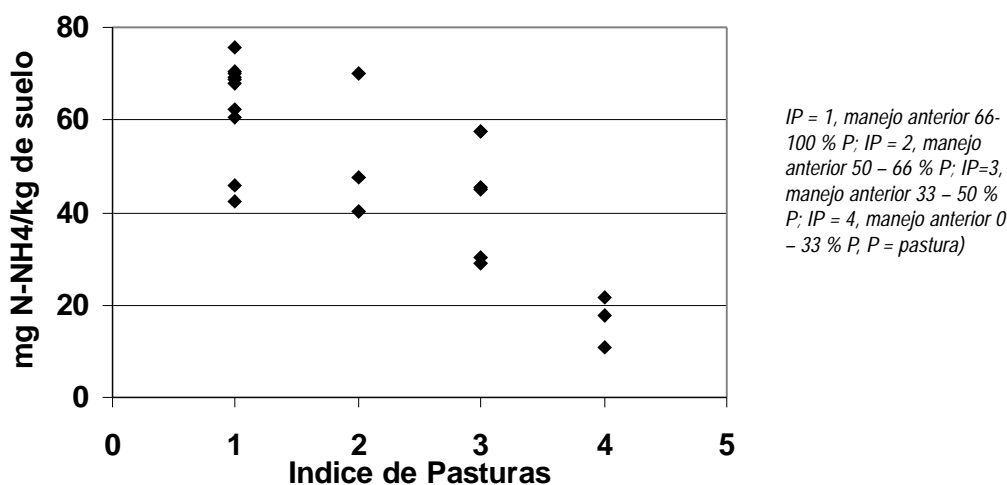


Figura 3. Relación entre el Índice de pasturas (IP) y el N mineralizado en forma anaeróbica. Carriquiry et al. (1999).

Los resultados muestran que a medida que este índice de pasturas aumenta (menor porcentaje del tiempo total de rotación bajo pasturas) disminuye el PMN. La variabilidad detectada entre situaciones clasificadas a priori como de igual PMN (mismo IP), son prueba que no basta con considerar únicamente el manejo anterior. La cantidad de factores involucrados en la cantidad de N incorporado por las pasturas (productividad, porcentaje de leguminosas entre otros) determina la imposibilidad de considerarlos a todos en un índice de caracterización (IP).

Estos mismos autores encontraron que el porcentaje de N mineralizado, un indicador de la calidad del mismo, también disminuía con la reducción del tiempo bajo pasturas. Esto demuestra la presencia de un pool más lábil de N cuando se incluyen pasturas en los sistemas.

Para condiciones semiáridas de Australia, Hossain et al.(1996) encontraron que la incubación anaeróbica detectó diferencias significativas entre manejos de suelo. Así, la rotación de cuatro años de alfalfa y cuatro años de trigo tuvo un potencial de

mineralización de N ocho veces superior al de trigo continuo siendo un indicador mucho más sensible que el contenido de N total del suelo. Los autores encontraron además una alta asociación del PMN con el nivel de nitratos en el suelo.

En la Figura 4 se presentan los valores de PMN para diferentes etapas de la rotación en el experimento de INIA La Estanzuela ya descrito.

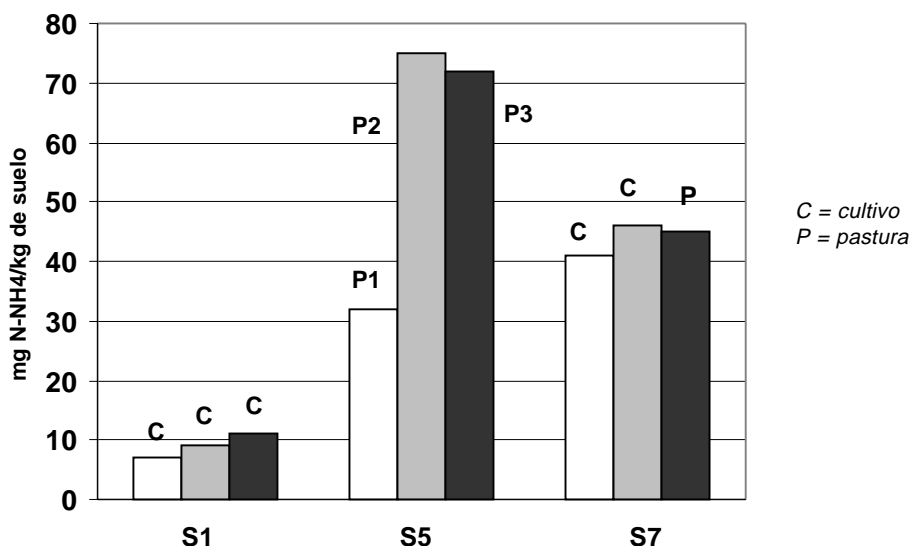


Figura 4. N mineralizado por incubación anaeróbica según etapas de la rotación de los Sistemas 1, 5 y 7 (ya descritos) en INIA La Estanzuela.

Nuevamente se resalta el efecto de las pasturas en el incremento del PMN, lo que queda claro en el sistema 5, con una pronunciada reducción cuando finaliza la etapa de cultivos previo a la instalación de la pastura (P1). El sistema 7 presenta valores intermedios en el PMN y además una menor variación entre etapas de la rotación. La pastura sembrada en este sistema es de corta duración y menor productividad (por lo tanto menor capacidad de aporte de N) y la fase de cultivos presenta menor tiempo de barbecho que en el sistema 5.

Introducción de la siembra directa: sistemas de cultivo continuo

En el sistema de siembra directa existe una importante retención de residuos en superficie debido a la no-remoción del suelo. Las tasas de descomposición de los residuos en superficie son en general más lentas que con residuos enterrados. Este proceso está además influenciado por otros factores: la relación C/N del residuo, su contenido de lignina, condiciones ambientales (temperatura y humedad), contenido inicial de nitrógeno del suelo y población microbiana (Schomberg et al., 1994). Este tema es profundizado por A. Morón en este mismo volumen.

En consecuencia la siembra directa, generalmente, resulta en un incremento en el contenido de materia orgánica en la zona superficial. Sin embargo, la magnitud de este cambio es dependiente del manejo anterior del suelo, secuencia de cultivos utilizada y de la cantidad y tipo de fertilizante aplicado que interaccionan fuertemente.

Suelos con manejo previo bajo agricultura continua

La gran mayoría de los experimentos de largo plazo bajo siembra directa existentes en el mundo evalúan rotaciones de cultivo continuo para grano. En general el punto de partida de estos experimentos son situaciones manejadas previamente bajo cultivos y con laboreo convencional.

En situaciones de este tipo, Martens (2000) reporta para una serie de experimentos llevados a cabo en Estados Unidos, un incremento en el contenido de materia orgánica en los tratamientos de siembra directa, siempre que la productividad de los cultivos sea comparable a la del laboreo convencional.

Como fue reseñado previamente, la secuencia de cultivos elegida puede afectar la acumulación de C orgánico en el suelo. Lal et al., (1994) en un experimento de 28 años de duración bajo siembra directa, encontraron un mayor contenido de C orgánico en la rotación de maíz continuo, comparado con la rotación maíz-soja y maíz-avena-raigrás. Los autores atribuyen el mayor contenido de C en la rotación bajo maíz continuo al mayor retorno de residuos.

Schomberg et al. (1994) reportan un incremento en el contenido de C orgánico bajo siembra directa de 0, 5 y 14 % con respecto al laboreo convencional para rotaciones soja-soja, sorgo-soja y sorgo-sorgo respectivamente.

Esto enfatiza la necesidad de incluir cultivos de alta relación C/N en las rotaciones como forma de promover el incremento en los contenidos de C orgánico.

Martens (2000) sugiere que los mecanismos por los cuales en siembra directa se reducen las pérdidas de C son: a) reducción de las pérdidas por erosión, b) menor tasa de descomposición de residuos, c) incremento en la biomasa microbiana, lo que hace que parte del C de los residuos sea reciclado en la biomasa microbiana en lugar de perderse como CO₂ y d) incremento en la población de hongos (de mayor relación C/N) respecto a la bacteriana con el consecuente aumento en la retención de C, por lo que menos CO₂ se pierde a la atmósfera.

Uno de los problemas asociados a la rotación de cultivos continuos bajo siembra directa puede ser la disponibilidad de N para los cultivos. Si la productividad de los cultivos es alta, mayor es la cantidad de N retirada con el grano, pudiendo generar balances negativos de N por lo que estos sistemas pueden volverse mucho más dependientes del agregado de fertilizante nitrogenado.

En ese sentido, Morón y Sawchik (2000) en Uruguay, trabajando sobre sistemas ya establecidos bajo siembra directa y en cultivo continuo, encontraron valores bajos de PMN y que además estaban en forma importante de los sitios indisturbados utilizados como referencia.

Suelos con manejo previo bajo pasturas

La situación cambia cuando se parte de una pastura. Blevins (1977) partiendo de pasturas nativas, con 1,9 % de C orgánico en el suelo encontró que luego de una rotación de maíz continuo el valor original de C caía a 1,6 % con siembra directa y a 0,98 % con laboreo convencional. En este mismo sitio, Ismail et al. (1994) citados por Martens (2000), lograron recuperar el contenido de C orgánico al nivel original con la incorporación de un cultivo de cobertura de invierno y aplicaciones más altas de fertilizante nitrogenado.

Dabney et al. (1993), citados por Martens (2000), también reportan un descenso del contenido de C orgánico a partir de una pastura permanente para una rotación de soja continua de 22,4 y 13,3 % con laboreo convencional y siembra directa respectivamente en sólo dos años de estudio.

En la región pampeana húmeda de la Argentina, Andriulo y Cordone (1998) en diferentes experimentos que incluyen siembra directa estudiaron la evolución de la materia orgánica y observaron que después de una pastura de seis años a base de Festuca, con una rotación trigo/soja – maíz de muy buena productividad, la siembra directa elevó el contenido de C del suelo mientras que el laboreo convencional y vertical (con cincel) mantuvieron los valores de partida luego de 12 años.

Sin embargo, cuando el punto de partida fue un suelo degradado bajo agricultura continua y con problemas de compactación, los rendimientos de los cultivos bajo siembra directa fueron iguales o menores que bajo laboreo convencional o vertical por lo que no se detectaron diferencias significativas entre tratamientos en el contenido de C orgánico.

En Uruguay, los sistemas de siembra directa bajo cultivo continuo se han desarrollado sobre suelos en general manejados en rotación con pasturas y con altos niveles de fertilidad natural. En este caso la elección de la secuencia de cultivos, incluyendo aquellos que dejan altos volúmenes de rastrojo de baja calidad como sorgo o maíz, es fundamental para conservar o incrementar los contenidos de C del suelo.

En este sentido Ernst (2000), para un experimento de manejo de suelos instalado en Uruguay en 1993, determinó que luego de siete años el stock de C orgánico en la profundidad 0-12 cm se mantuvo para los tratamientos de agricultura continua y rotación cultivo-pastura sin laboreo. En cambio sí se detectaron reducciones en los tratamientos bajo laboreo convencional. La disminución en la tasa de mineralización de la materia orgánica y de los procesos de erosión en los tratamientos sin laboreo serían las principales causas de estos resultados.

En rotaciones de cultivos forrajeros para pastoreo o silo que no incluyen pasturas es altamente probable que se generen balances negativos de C por el bajo retorno de los residuos. Esto ha sido observado para las condiciones de Uruguay por Morón et al. (datos no publicados).

Inclusión de leguminosas anuales en sistema bajo cultivo continuo

La inclusión de leguminosas anuales en sistemas de siembra directa bajo cultivo continuo puede ser una alternativa interesante para reducir las necesidades de fertilizante nitrogenado. La contribución será positiva en la medida que otros factores, como por ejemplo el uso de agua del suelo por la leguminosa, no sea limitante para el cultivo posterior.

En el sudeste de Estados Unidos éste es un tópico que ha sido muy estudiado. Smith et al. (1987) en una amplia revisión sobre el tema estimaron que diferentes especies de leguminosas anuales pueden acumular un promedio de más de 100 kg de N/ha en la parte aérea.

Estos autores estiman, basándose en varios experimentos, un valor de equivalente fertilizante de entre 75 y 100 kg de N/ha. Con este cálculo en general se sobrestima la capacidad de aporte de N debido a que otros factores englobados en el concepto «efecto rotación» no pueden ser separados del efecto del N.

En Uruguay, Torres y del Pino (1995) evaluaron el efecto de un trébol rojo de corta duración sobre la disponibilidad de N para cultivos de invierno y verano. El N acumulado en la parte aérea tuvo un rango de 60 a 150 kg de N/ha. En general los cultivos de invierno mostraron baja recuperación aparente del N proveniente del residuo de las leguminosas, pasando buena parte de éste al pool de N orgánico del suelo. En cambio en los cultivos de verano, la descomposición del residuo se vio acelerada por la temperatura y existió una buena sincronización entre la demanda de N por el cultivo y la oferta de N por parte del suelo.

En general el objetivo principal del uso de una leguminosa anual en una rotación de cultivos de grano es lograr la mayor sincronización posible en estos dos aspectos. Para ello es necesario conocer además como son los patrones de liberación de N de los residuos de leguminosas en superficie. Wilson y Hargrove (1896) determinaron tasas de descomposición más lentas para residuos de leguminosas en superficie. El porcentaje de N remanente en los residuos a las 4 y 16 semanas fue de 40 y 31 % con laboreo convencional y 63 y 36 % con siembra directa, teniendo este sistema una mayor variación entre años.

Otro factor muy importante es determinar el momento óptimo de secado de la leguminosa para maximizar la residualidad de N para el cultivo siguiente.

Wagger (1989) comparó la liberación de N de residuos de *Trifolium incarnatum* en dos estados de desarrollo: 50 por ciento de floración y comienzo de llenado de grano. Si bien en el 2º tratamiento el contenido de N era mayor, la tasa de descomposición fue más lenta debido a una mayor proporción de carbohidratos estructurales. Estudios posteriores (Ranells y Wagger, 1992) estimaron que la liberación de N por esta leguminosa fue de 50 a 70 kg de N/ha para el fin de la floración y representaba la alternativa mejor para el cultivo de verano posterior.

Parece claro entonces que en aquellos sistemas que incluyen solamente cultivos para grano, la alternancia con leguminosas anuales es una opción razonable para reducir la dependencia del fertilizante nitrogenado.

Inclusión de la siembra directa en los sistemas mixtos: cambios en la dinámica de nitrógeno

Mineralización – inmovilización de N bajo siembra directa

Bajo siembra directa se producen cambios que pueden tener impactos sobre la dinámica de N, independientemente del sistema de producción. La acumulación de residuos en superficie de más lenta descomposición que en condiciones de laboreo convencional, determina un incremento en el contenido de materia orgánica en la zona superficial con una marcada estratificación de nutrientes.

La no-remoción del suelo, los mayores contenidos de humedad y las menores temperaturas son factores que afectan la tasa de mineralización de N. El pasaje de una situación de laboreo convencional a uno de siembra directa determina una fase de inmovilización de N en las etapas iniciales dependiendo esto de cuán degradado esté el suelo originalmente.

En general, es esperable que la conversión de sistemas de laboreo convencional a siembra directa determine en los primeros años menores disponibilidades de nitrógeno mineral debido a una tasa de mineralización de N más lenta y paralelamente una mayor inmovilización de N.

En ese sentido, en Uruguay, en una red de experimentos de fertilización de cebada cervecera, Hoffman y Perdomo (1999) encontraron en general disponibilidades bajas de N mineral como nitrato en situaciones sin laboreo y una mayor respuesta al agregado de N. Cabe acotar que estas situaciones estaban en general bajo siembra directa ocasional.

Es esperable que en un sistema continuo de siembra directa aumente el pool de N orgánico y del N potencialmente mineralizable. Así, Bordoli et al. (1999), trabajando en ensayos de respuesta a N en trigo en sistemas de siembra directa ya establecidos,

reportó muchas situaciones en las que no hubo respuesta al agregado de nitrógeno por una disponibilidad suficiente de nitratos en el suelo.

Martens (2000) reporta que mientras en sistemas de laboreo convencional, el C se vuelve limitante acelerando la liberación de N, en la siembra directa el N es el factor limitante por el proceso de inmovilización.

La incorporación de la siembra directa en los sistemas de rotación cultivo -pastura presentaría una serie de ventajas: la menor tasa de mineralización del N orgánico por no mover el suelo evitaría la caída tan pronunciada del contenido de N del suelo que se observa cuando se roturan buenas pasturas bajo laboreo convencional. El aporte de N proveniente de la pastura sería entonces más estable y duradero en el tiempo permitiendo recuperaciones de N más altas por los cultivos y permitiría plantear la hipótesis de alargar la fase de cultivos con respecto a lo que sucede bajo laboreo convencional.

Al igual que bajo laboreo convencional, son previsibles efectos de corto y largo plazo en la dinámica de N.

Siembra directa en sistemas mixtos: efectos de corto plazo en la dinámica de nitrógeno

Uno de los objetivos más importantes a corto plazo, es lograr que en la fase de salida de la pastura exista una buena disponibilidad de N mineral para el 1er cultivo en la medida que esto representa un ahorro de fertilizante nitrogenado.

Para esto es necesario tener en cuenta entre otros, los siguientes factores: el tipo o calidad de la pastura de la cual se parte, el momento del año que determina ambientes más o menos favorables para la descomposición de los residuos y variaciones en las tasas de mineralización de N del suelo y también la fertilidad del suelo.

Tipo y calidad de la pastura

La calidad de la pastura, que puede caracterizarse en base a su relación C/N, contenido de lignina, entre otros, afecta fuertemente la tasa de descomposición de los residuos.

Si la situación de partida es una pradera vieja con un fuerte componente de pasto bermuda o gramón (*Cynodon Dactylon* L.), la alta relación C/N de sus residuos (mayores a 30) determinará condiciones de inmovilización neta por un período largo de tiempo. Por el contrario, los residuos de leguminosas si bien presentan tasas más lentas de descomposición en superficie que enterrados, producen condiciones de mineralización neta de N y pueden determinar acumulaciones de N mineral suficientes para el cultivo.

En ese sentido, Varco et al. (1993), trabajando con residuos de vicia marcados con N¹⁵ encontraron una mayor disponibilidad de N mineral para el 1er cultivo con residuos enterrados que en superficie. Esto fue atribuido a una tasa de descomposición más rápida con el residuo enterrado. Los autores encontraron además una mayor inmovilización temporaria de N en la biomasa microbiana bajo laboreo convencional debido a la mayor tasa de descomposición del residuo.

Temperatura y época del año

El momento del año es otro factor que afecta los procesos de descomposición y mineralización. El aumento de la temperatura provoca incrementos en la tasa de descomposición de los residuos y además acelera la tasa de mineralización de N orgánico del suelo.

El período de barbecho como variable de manejo

Una manera de manejar las diferencias en la calidad de las pasturas y el momento del año en donde comienza la fase de cultivos y lograr una adecuada acumulación de N mineral, es la utilización estratégica del tiempo de barbecho, que se define como el período que transcurre entre la aplicación del herbicida total y la siembra.

En términos generales, con residuos de baja calidad (de alta relación C/N) los tiempos de barbecho necesarios para lograr una disponibilidad de N mineral aceptable deberían ser más largos que con residuos de baja relación C/N. Por otra parte, si tenemos un cultivo de invierno como cabeza de rotación, los períodos de barbecho deberían ser más largos porque las bajas temperaturas y el bajo contenido de N mineral en el suelo van a ser limitantes para la descomposición.

Ernst (2000) en praderas viejas dominadas por *Cynodon*, encontró una mayor disponibilidad de N mineral como nitrato a la siembra para un cultivo de avena con los barbechos de mayor duración (97 y 105 días para dos situaciones). En otros trabajos sobre situaciones similares, este autor sugiere como alternativa la utilización de un verdeo de verano corto, previa aplicación de glifosato en el mes de noviembre, para cumplir con el doble propósito de controlar y acelerar la descomposición del pasto bermuda y obtener un rédito del verdeo sembrado.

Cuando un cultivo de verano es cabeza de rotación luego de una pradera o verdeo, el largo de barbecho es una variable que puede afectar además de la disponibilidad de nitrógeno, la reserva de agua disponible para el cultivo de verano. Esto será especialmente importante en suelos con baja capacidad de almacenaje de agua o con limitaciones para el desarrollo radicular como sucede en suelos con diferenciación textural (Cuadro 3).

Cuadro 3. Efecto de la duración del barbecho sobre la disponibilidad de N mineral y humedad (porcentaje en peso) a la siembra de maíz y sorgo para dos situaciones de partida (Sawchik, 2000).

Duración del período de barbecho (días)	Antecesor: Pastura (60 – 70 % de leguminosas)	
	Concentración de N-NO ₃ (mg/kg) a 0-20 cm de prof.	Humedad en peso (expresada como %)
106	41,1	21,1
61	39,5	17,7
35	23,4	13,1
Antecesor: Avena + Raigrás		
102	12,7	22,0
72	10,8	18,9
34	5,7	16,0

Cuando el antecesor fue una pastura de buena calidad, un mayor período de barbecho determinó una mayor acumulación de N mineral al momento de la siembra. Sin embargo, los valores de nitrato obtenidos fueron suficientes para los cultivos de verano en todos los tratamientos. El período de barbecho largo permitió un mayor almacenaje de agua para el cultivo. Ernst (2000) reporta un mayor contenido de humedad en el suelo para

un cultivo de maíz sobre maíz que cuando el antecesor fue una avena creciendo hasta la siembra del cultivo de verano.

En la situación que provenía de avena – raigrás, también existió un efecto del largo de barbecho en la acumulación de N. Sin embargo el suelo estaba bajo un sistema de siembra directa continuo de cultivos anuales forrajeros y presentaba un PMN mucho menor.

Mohr et al. (1999) estudiaron el efecto del laboreo y el momento de terminación de una pastura de alfalfa sobre la capacidad de suministro de N para cultivos de trigo posteriores. La aplicación de un herbicida total y el no laboreo enlentecieron la liberación de N de los residuos de alfalfa y determinaron una menor capacidad de suministro de N que bajo laboreo convencional, coincidente con los resultados obtenidos por Varco et al. (1991).

A pesar de esto, bajo no laboreo, se produjo una buena sincronización entre la oferta de N de los residuos de leguminosas y la demanda por el cultivo de trigo. Los autores sugieren que esta medida de manejo reduce las probabilidades de pérdida de N mineral. Estos resultados concuerdan con los de Levin et al. (1987), quienes encontraron dosis óptimas de N similares para maíces sembrados en laboreo convencional y siembra directa sobre pasturas de alfalfa de larga duración.

Mohr et al. (1999) observaron que cuando el período de barbecho se acertaba (herbicida aplicado cerca de la siembra del trigo) se redujo notoriamente la disponibilidad de N y los rendimientos posteriores del trigo. Los efectos de los tratamientos se diluyeron luego del 1er cultivo.

En la Figura 5 se presenta la evolución del N mineral como nitrato hasta la siembra de un cultivo de trigo, en la salida de una pastura de alfalfa bajo laboreo convencional o siembra directa.

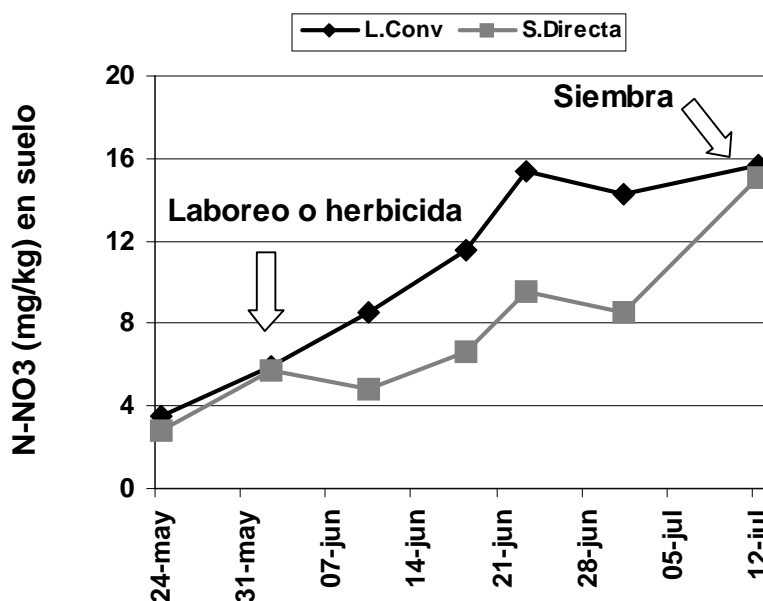


Figura 5. Evolución de la concentración de nitratos en el suelo para la salida de pastura de alfalfa en laboreo convencional y siembra directa; información de un experimento de rotaciones y laboreo instalado en 1996 en INIA La Estanzuela.

En este caso los tratamientos de aplicación del herbicida total y laboreo se realizaron en la misma fecha. Con un barbecho de 45 días sobre una pastura de buena calidad se alcanzó la misma disponibilidad de N como nitrato tanto en convencional como en siembra directa. No hubo diferencias significativas en el nivel de nitratos luego de la siembra del trigo, ni en la absorción de N por el cultivo (datos no presentados). Esto enfatiza la importancia de adecuar los períodos de barbecho al tipo de pastura y época del año.

Siembra directa en sistemas mixtos: efectos de largo plazo en la dinámica de C y N

Como se dijo previamente, la inserción de pasturas en sistemas bajo siembra directa tiene además de los efectos de corto plazo ya reseñados, variaciones en el mediano y largo plazo en indicadores relacionados con la dinámica de C y N.

Con esta hipótesis, en 1996, en INIA La Estanzuela se inició un experimento que contrasta por un lado la inclusión o no de pasturas en sistemas de siembra directa y laboreo convencional y en segundo lugar el manejo de los rastrojos como variable de directa implicancia en el corto y largo plazo en el funcionamiento del sistema.

Sawchik y Morón (1999) reportan necesidades mayores de fertilizante nitrogenado bajo siembra directa en los primeros años del experimento. La situación de partida era un suelo degradado, y probablemente la inmovilización de N sea la razón de esto. Las deficiencias en disponibilidad de nitrógeno fueron más marcadas en los cultivos de invierno y especialmente en la cebada que se siembra luego de maíz (residuo de alta relación C/N).

Los autores no detectaron diferencias significativas en el contenido de C orgánico y N total para los tratamientos evaluados. Las tendencias muestran un leve descenso del C orgánico con respecto al valor original en el tratamiento de cultivo continuo bajo laboreo convencional. Cuando se retiran los rastrojos esa tendencia se acentúa.

Se detecta una importante estratificación para estos dos indicadores en los tratamientos de siembra directa (cultivo continuo o rotación cultivo - pastura).

En la Figura 6 se presenta la evolución del N total del suelo en superficie (0-7,5 cm) para algunos tratamientos del experimento.

Los resultados muestran una caída en el contenido de N total en el tratamiento de cultivo continuo con retiro parcial del rastrojo, mientras que cuando se deja el rastrojo el N total permanece constante. Si consideramos que la situación de partida fue una pastura vieja de Lotus, resulta interesante que luego de cinco años de cultivo continuo con buenas productividades, no se producen en este tratamiento las caídas de N total observadas normalmente bajo laboreo convencional.

Por otra parte, es clara la acumulación de N durante la fase de pastura de alfalfa. La caída en el contenido de N total una vez empezada la fase de cultivos es mayor en el tratamiento de laboreo convencional que en el de siembra directa (datos no presentados). Esta información primaria avala la hipótesis que bajo siembra directa la residualidad del N dejado por las pasturas sería más estable en el tiempo.

Heeman (1996) citado por Kumar y Goh (1999) encontró que una rotación de trébol subterráneo y trigo bajo siembra directa y retención de residuos presentó contenidos de C orgánico y N total mayores que la misma rotación con laboreo convencional o con siembra directa y retiro de forraje.

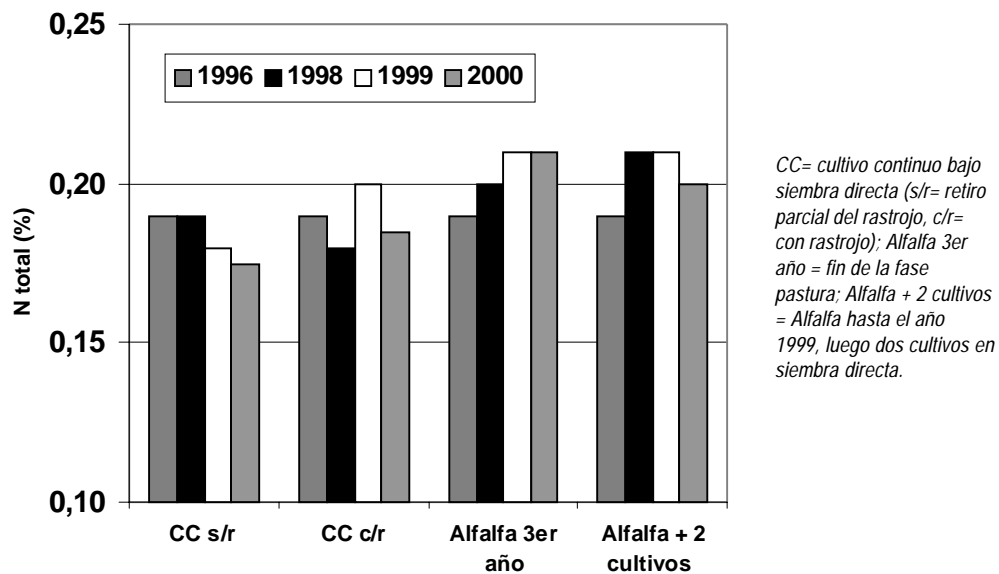


Figura 6. Evolución del N total del suelo (0-7.5 cm de profundidad) para diferentes tratamientos en experimento de rotaciones bajo siembra directa instalado en 1996 en INIA La Estanzuela.

Cambios en los componentes más activos del C y N orgánicos

Si bien los indicadores de largo plazo, mencionados para el experimento de La Estanzuela, mostraron tendencias de cambio, es necesario identificar indicadores más sensibles que reflejen en mayor medida los cambios que se están induciendo por el manejo de los suelos.

En la Figura 7 se presentan los potenciales de mineralización de N por incubación anaeróbica para algunos tratamientos seleccionados en el experimento.

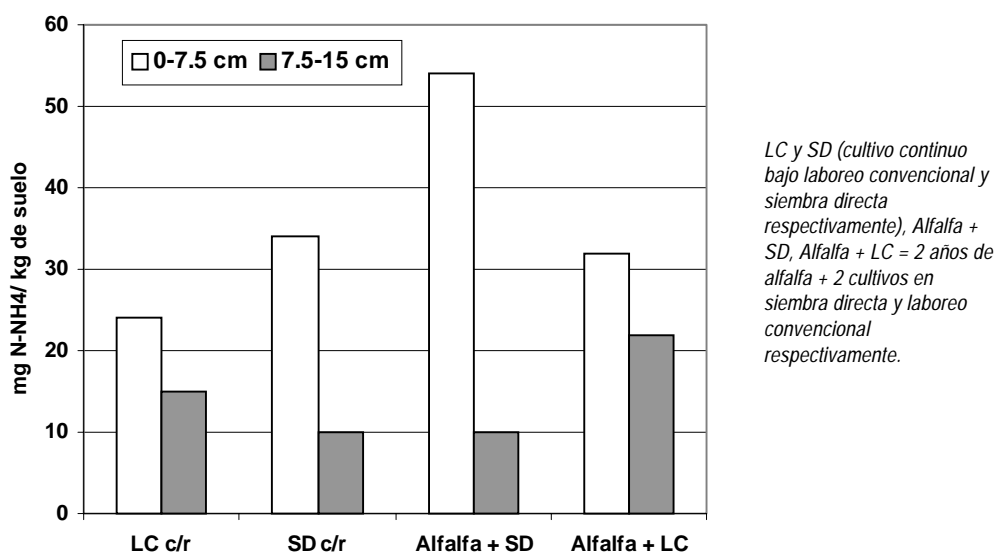


Figura 7. N mineralizado por incubación anaeróbica para tratamientos seleccionados en experimento de rotaciones bajo siembra directa instalado en 1996 en INIA La Estanzuela.

El PMN se mostró como una variable más sensible para detectar los cambios producidos por los diferentes manejos. Los resultados muestran una clara estratificación en los tratamientos de siembra directa, tanto en cultivo continuo como en la rotación cultivo – pastura.

Luego de cinco años de cultivo continuo, los valores de PMN son bajos tanto en laboreo convencional como en siembra directa, indicando que el pool de N más lábil es menor en estos sistemas.

En cambio, los sistemas que salen de pasturas presentan valores más altos de PMN, sobre todo cuando la fase de cultivos se inicia bajo siembra directa. Estas diferencias disminuyen en la medida que se considera todo el perfil muestreado.

Cabe acotar que el PMN tiene como limitante importante el hecho que no necesariamente ese potencial se traduzca en diferencias tan grandes en la mineralización de N a campo. En invierno, en condiciones de suelo frío, con limitaciones en las tasas de mineralización de N, las diferencias entre manejos pueden expresarse en forma más débil.

El uso de otros indicadores como por ejemplo la materia orgánica particulada (POM) con una tasa de reciclaje mayor que la materia orgánica y especialmente el C y N en la POM (C-POM y N-POM) fue explorado con éxito en Uruguay como herramientas para el diagnóstico de uso y manejo de suelos (Morón y Sawchik, 2000).

Estos autores encontraron que tanto el C-POM y N-POM en la fracción gruesa (212 – 2000 micras) presentó una alta asociación con el PMN lo cual sugiere que el N fácilmente mineralizable se encuentra en la POM de mayor tamaño. Estos resultados son similares a los obtenidos por Chan (1997). Este autor sugiere que el C-POM (mayor a 53 micras) representaba la principal forma de C que se pierde y se gana en un ciclo de cultivos y pasturas respectivamente, siendo un indicador mucho más sensible que los tradicionalmente usados.

Ernst (2000) encontró que las secuencias de cultivo sin laboreo determinaron una mayor estabilidad estructural de agregados que bajo laboreo convencional. Chan (1997) reporta que los cambios en la POM están muy asociados a esta medida.

Los sistemas productivos agrícola – ganaderos de la región con un componente fuerte de producción de leche o carne seguirán basándose en la inclusión de pasturas como forma de abaratar los costos del forraje y parece lógico que la inclusión de la siembra directa sea de gran impacto.

La introducción de la siembra directa en la rotación cultivo – pastura parece una excelente alternativa. Desde el punto de vista de la dinámica de N las ventajas parecen ser claras. Una de ellas es la posibilidad de usar más eficientemente el N dejado por la pastura por los cultivos siguientes. Quizás, la interrogante más grande sea hasta donde son sostenibles los sistemas de cultivo continuo para grano desde el punto de vista del balance de N.

La utilización de nuevos indicadores como los reseñados parece ser una herramienta valiosa para detectar cambios en el corto y mediano plazo y así planificar un uso más adecuado del recurso suelo.

Literatura citada

- ANDRIULO, A. y CORDONE, G. 1998. Impacto de labranzas y rotaciones sobre la materia orgánica de suelos de la Región Pampeana Húmeda. In: Panigatti, J.L.; Marelli, H.; Buschiazzi, D.; Gil, R. (eds) INTA Siembra directa. P 65-97.

- BAETHGEN, W.E. 1992. Fertilización nitrogenada de cebada cervecera. INIA Serie Técnica No 54, 27 p.
- BLEVINS, R.L.; THOMAS, G.W.; SMITH, M.S.; FRYE, W.W. y CORNELIUS, P.L. 1983. Changes in soil properties after 10 years continuous non-tilled and conventionally tilled corn. *Soil & Tillage Research* 3:135-146.
- BORDOLI, M.; QUINCKE, A. y MARCHESI, A. 1999. Fertilización NP de trigo en siembra directa. **In:** 1er Jornada sobre Rendimiento y Calidad de Trigo, Mesa Nacional de Trigo, Mercedes, Uruguay, p 35-40.
- BRUULSEMA, T.W. y CHRISTIE, B.R. 1987. Nitrogen contribution to succeeding corn from alfalfa and red clover. *Agron. J.* 79:96-100.
- CARRIQUIRY, M.; MORÓN, A. y SAWCHIK, J. 1999. Potencial de mineralización de Nitrógeno de suelos del Area agrícola del Uruguay. **In:** Comisión V Fertilidad de Suelos y Nutrición de Plantas. 14 Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Chile, Nov. 1999. CD-ROM.
- CHAN, K.Y. 1997. Consequences of changes in particulate organic carbon in Vertisols under pasture and cropping. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:1376-1382.
- CROZIER, C.R.; KING, L.D. y HOYT, G.D. 1994. Tracing nitrogen movement in corn production systems in the North Carolina Piedmont: Analysis of nitrogen pool size. *Agron. J.* 86:642-649.
- _____; KING, L.D. y VOLK, R.J. 1998. Tracing nitrogen movement in corn production systems in the North Carolina Piedmont: A Nitrogen-15 study. *Agron. J.* 90:171-177.
- DANSO, S.K.A.; CURBELO, S.; LABANDERA, C. y PASTORINI, D. 1991. Herbage yield and nitrogen-fixation in a triple-species mixed sward of white clover, lotus and fescue. *Soil Biol. Biochem.* Vol. 23:65-70.
- DÍAZ-ROSELLÓ, R. 1992a. Evolución del nitrógeno total en rotaciones con pasturas. *Rev. INIA Inv. Agr.* No 1, Tomo I:27-35.
- _____. 1992b. Evolución de la materia orgánica en rotaciones de cultivos y pasturas. *Rev. INIA Inv. Agr.* No 1, Tomo I:103-110.
- ERNST, O. 2000. Siete años de siembra sin laboreo. Cangüé, Revista de la Estación Experimental "Dr. Mario Cassinoni", Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Uruguay. No. 20:9-13.
- _____. 2000. Siembra sin laboreo: Manejo del período de barbecho. Cangüé, Revista de la Estación Experimental "Dr. Mario Cassinoni", Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Uruguay. No. 20:19-21.
- GARCÍA LAMOTHE, A. 1994. Manejo del nitrógeno para aumentar la productividad de trigo. INIA Serie técnica No. 54, 27 p.
- _____. 1998. Fertilización con N y potencial de rendimiento en trigo. **In:** Kohli, M.M.; Martino, D. (eds). "Explorando Altos Rendimientos de Trigo". La Estanzuela, Uruguay, Octubre 20-23, 1997, CIMMYT – INIA, p 207-247.
- _____ y Morón, A. 1992. Estudios de C, N y P en la biomasa microbiana del suelo en tres sistemas de rotación agrícola. *Rev. INIA Inv. Agr.* No 1, Tomo I:111-126.

- GARCÍA, J.A.; LABANDERA, C.; PASTORINI, D. y CURBELO, S. 1994. Fijación de nitrógeno por leguminosas en La Estanzuela. *In*: INIA Serie Técnica No 51:13-18.
- HARRIS, G.H. y HESTERMAN, O.B. 1990. Quantifying the nitrogen contribution from alfalfa to soil and two succeeding crops using nitrogen-15. *Agron. J.* 82:129-134.
- _____; HESTERMAN, O.B.; PAUL, E.A.; PETERS, S.E. y JANKE, R.R. 1994. Fate of legume and fertilizer nitrogen-15 in a long term cropping systems experiment. *Agron. J.* 86:910-915.
- HOFFMAN, E. y PERDOMO, C. 1999. Criterios para el manejo de la fertilización nitrogenada en cultivos extensivos bajo cero laboreo. Curso de Actualización "Siembra sin laboreo de cultivos y pasturas". Facultad de Agronomía – INIA – PROCISUR CD - ROM.
- HOLFORD, I.C.R. 1980. Effects of duration of grazed lucerne on long-term yields and nitrogen uptake of subsequent wheat. *Aust. J. Agric. Res.* 31:239-250.
- HOSSAIN, S.A.; DALAL, R.C.; WARING, S.A.; STRONG, W.M. y WESTON, E.J. 1996. Comparison of legume-based cropping systems at Warra, Queensland. I. Soil nitrogen and organic carbon accretion and potentially mineralisable nitrogen. *Aust. J. Soil Res.* 34:273-287.
- KUMAR, K. y GOH, K.M. 2000. Crop residues and management practices: effects on soil quality, soil nitrogen dynamics, crop yield and nitrogen recovery. *Advances in Agronomy* 68:197-319.
- JARVIS, S.C.; STOCKDALE, E.A.; SHEPHERD, M.A. y POWLSON, D.S. 1996. Nitrogen mineralization in temperate agricultural soils: processes and measurement. *Advances in Agronomy* 57:187-235.
- LADD, J.N. y AMATO, M. 1986. The fate of nitrogen from legume and fertilizer sources in soils successively cropped with wheat under field conditions. *Soil Biol. Biochem.* Vol. 18, 4:417-425.
- LAL, R.; MAHBOUBI, A. A. y FAUSEY, N.R. 1994. Long term tillage and rotation effects on properties of a Central Ohio soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:517-522.
- LEVIN, A.; BEEGLE, D.B. y FOX, R.H. 1987. Effect of tillage on residual nitrogen availability from alfalfa to succeeding corn crops. *Agron. J.* 79:34-38.
- MALLARINO, A.P. y WEDIN, W.F. 1990. Seasonal distribution of topsoil ammonium and nitrate under legume-grass and grass swards. *Plant and Soil* 124:137-140.
- MARTENS, D.A. 2000. Nitrogen cycling under different soil management systems. *Advances in Agronomy* 70:143-191.
- MARTINO, D.; CALDEYRO, M.; BOZZANO, A.; BAETHGEN, W. y DÍAZ, R. 1986. Residualidad del nitrógeno dejado por pasturas. II. Efecto de la duración de pasturas. *Investigaciones Agronómicas* No. 7 Vol. 1:59-66.
- MCCOWN, R.L.; COGLE, A.L.; OCKWELL, A.P. y REEVES, T.G. 1987. Nitrogen supply to cereals in legume ley systems under pressure. *In*: Wilson, J.R. ed. *Advances in nitrogen cycling in agricultural ecosystems, Australia*, p 292-314.
- MOHR, R.M.; ENTZ, M.H.; JANZEN, H.H. y BULLIED, W.J. 1999. Plant available nitrogen supply as affected by method and timing of alfalfa termination. *Agron. J.* 91:622-630.

- MORÓN, A. y SAWCHIK, J. 2000. Diagnóstico de uso y manejo de suelos mediante nuevos indicadores biológicos en Uruguay. 8º Congreso Nacional AAPRESID Mar del Plata, Argentina.
- MORRIS, T.F.; BLACKMER, A.M. y EL-HOUT, N.M. 1993. Optimal rates of nitrogen fertilization for first-year corn after alfalfa. *J. Prod. Agric.* 6:344-350.
- PERDOMO, C.; HOFFMAN, E.; PASTORINI, M. y PONS, C. 1999. Fertilización nitrogenada en el cultivo de cebada cervecera. **In:** VIII Jornadas de Investigación en Cebada Cervecera. Mesa Nacional de Entidades Malteras. Minas, Uruguay.
- RANNELLS, N.N. y WAGGER, M.G. 1992. Nitrogen release from crimson clover in relation to plant growth stage and composition. *Agron. J.* 84:424-430.
- SAWCHIK, J. y MORÓN, A. 1999. Rotaciones bajo siembra directa: Avance de Resultados. **In:** Serie de Actividades de Divulgación No. 188, p 21-23.
- _____; 2000. Importancia y manejo de los rastrojos para siembra directa. Seminario "Actualizando la tecnología en control de malezas", Setiembre de 2000, INIA La Estanzuela, Uruguay.
- SCHOMBERG, H.H.; FORD, P.B. y HARGROVE, W.L. 1994. Influence of crop residues on nutrient cycling and soil chemical properties. **In:** Unger, P.W. ed. *Managing agricultural residues*: p 100-116.
- SMITH, M.S.; FRYE, W.W. y VARCO, J.J. 1987. Legume winter cover crops. *Advances in Soil Science* 7:96-132.
- STUDDERT, G.A.; ECHEVERRÍA, H.E. y CASANOVAS, E.M. 1997. Crop-pasture rotation for sustaining the quality and productivity of a Typic Argiudoll. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:1466-1472.
- TORRES, D. y DEL PINO, A. 1995. Dynamics of soil nitrogen in agrosystems with addition of fertilizer and incorporation of legumes. **In:** Ljunggren, H.; Favelukes, G.; Dankert, M.A. (eds.) SAREC, Conference Efficient use of Biological Nitrogen Fixation: Accomplishments and Prospects. Buenos Aires, December 5-7, 1995.
- VARCO, J.J.; GROVE, J.H.; FRYE, W.W. y SMITH, M.S. 1991. Nitrogen availability from alfalfa suppressed or killed for no-till production. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 22:1527-1535.
- _____; FRYE, W.W.; SMITH, M.S. y MACKOWN, C.T. 1993. Tillage effects on legume decomposition and transformation of legume and fertilizer nitrogen-15. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:750-756.
- WAGGER, M.G. 1989. Time of desiccation effects on plant composition and subsequent nitrogen release from several winter annual cover crops.
- WILSON, D.O. y HARGROVE, W.L. 1986. Release of nitrogen from crimson clover residue under two tillage systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50:1251-1254.

