

REVISTA DE INVESTIGACIONES DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS - UNR, NO 35 (20)

**Fracciones de carbono y nitrógeno del suelo
y productividad del trigo en el sudeste
bonaerense, Argentina.**

*Soil carbon and nitrogen fractions and wheat yield in
the south-east of Buenos Aires, Argentina.*

*Frações de carbono e nitrogênio do solo e
produtividade do trigo no sudeste de Buenos Aires,
Argentina.*

**Maria Rosa Landriscini¹, Juan Alberto Galantini²,
Horacio Forján³, Ramiro Javier García⁴**

¹ CERZOS-CONICET - Dpto. Agronomía, UNS

² CIC, Pcia. Bs. As. - CERZOS-CONICET

³ Investigador INTA Barrow

⁴ Docente Dpto. Agronomía, UNS

mlandris@criba.edu.ar

Recibido: 08/11/2019 / Aceptado: 12/08/2020 / Publicado:
06/09/2020

Resumen

El uso del suelo, las labranzas y las secuencias estivales, afectan la distribución y el contenido de carbono orgánico (CO), nitrógeno total (NT) y sus fracciones con diferente grado de labilidad. En la Chacra Experimental Integrada Barrow (INTA), se condujo un ensayo de larga duración, donde se evaluaron tres secuencias de cultivos, alternando leguminosas, oleaginosas y gramíneas, fertilización nitrogenada y labranza convencional. Los objetivos fueron: 1) determinar el efecto de las rotaciones y la fertilización sobre las fracciones orgánicas de C y N, 2) evaluar los cambios en el contenido de las fracciones con distinto grado de recalcitrancia (carbono orgánico mineral, COM y carbono orgánico recalcitrante, COR) e Índice de Recalcitrancia de C y N 3) evaluar la labilidad del C a través de las relaciones entre algunas fracciones de C y 4) estudiar el N potencialmente mineralizable, Nan, para conocer la capacidad de aportar N. La hidrólisis ácida separó las fracciones lábiles y recalcitrantes y se calculó el IR. Los cultivos aportaron diferentes cantidades de residuos ocasionando que cada sistema se comporte diferente aún con niveles semejantes de CO. Las secuencias con gramíneas y leguminosas, presentaron mayores concentraciones COT y de carbono orgánico particulado grueso, COPg, con 18% de labilidad. La secuencia con soja, cuyos residuos presentaron menor relación C:N, podría tener mayor susceptibilidad a la degradación química. El N potencialmente mineralizable no se asoció a las fracciones de C y fue más

abundante en la secuencia con soja. Las oleaginosas resultan ser mejores antecesoires que las gramíneas de verano en el rendimiento del trigo.

Palabras clave: Carbono orgánico; Índice de Recalcitrancia; Secuencias de cultivos

Abstract

Continued soil management, tillage system and summer crop sequences affect the distribution and stocks of soil organic carbon (OC), total nitrogen (TN) and their fractions, with different lability degrees. A long-term experiment was conducted in the Barrow Integrated Experimental Farm (INTA), where three crop sequences were evaluated, alternating legumes, oilseeds and grasses, N fertilization and conventional tillage. The aims of this study were: 1) to determine the effect of crop rotations and fertilization on the organic C and N fractions; 2) to evaluate the changes in the organic fractions content with different degrees of recalcitrance (mineral organic carbon, MOC, and recalcitrant organic carbon, ROC) and the recalcitrance index, RI; 3) to evaluate C lability through the relationships between the organic carbon fractions; 4) to study the potentially mineralizable N (Nan) related to N soil contribution. Labile and recalcitrant fractions were separated with acid hydrolysis and the RI was calculated. The crops provided different amounts of residues, which made each system behave differently even with similar OC levels. Grass-legume sequences had higher TOC and coarse particulate organic carbon fraction, with 18% lability. The sequence with soybean, the residues of which had a lower C:N ratio, could be more susceptible to chemical degradation. The potentially mineralizable N was not associated with OC fractions and was more abundant in the sequence with soy. Oilseeds were found to be better predecessors than summer grasses for wheat yield.

Key words: Organic Carbon; Recalcitrance Index; Crop sequences

Resumo

O uso do solo, a lavoura e as seqüências do verão afetam a distribuição e o conteúdo de carbono orgânico (CO), nitrogênio total (NT) e suas frações com diferentes graus de labilidade. Na Fazenda Experimental Integrada Barrow (INTA) foi realizado um estudo de longo prazo, onde foram avaliadas três seqüências de culturas, alternando leguminosas, oleaginosas e gramíneas, com adubação nitrogenada e preparo convencional. Os objetivos foram: 1) determinar o efeito das rotações e adubação das culturas nas frações orgânicas de C e N; 2) avaliar as alterações no conteúdo das frações com diferentes graus de recalcitância (carbono mineral orgânico, COM e carbono orgânico recalcitrante, COR) e índice de recalcitância de C e N; 3) avaliar a probabilidade de C através das relações entre algumas frações de carbono orgânico e 4) estudar o N potencialmente mineralizável (Nan) para conhecer a capacidade de contribuir com N. Uma hidrólise ácida foi usada para separar as frações lábeis e recalcitrantes e para medir o IR. As culturas forneceram diferentes quantidades de resíduos, fazendo com que cada sistema se comportasse de maneira diferente, mesmo com níveis semelhantes de CO. As seqüências com gramíneas e leguminosas apresentaram maior COT e fração de carbono orgânico particulado grosso POCc com 18% de labilidade. A seqüência com soja, cujos resíduos apresentaram menor relação C: N pode ser mais suscetível à

degradação química. O N potencialmente mineralizável não se associou às frações de C e foi mais abundante na sequência da soja. As oleaginosas se mostraram melhores antecessoras do que as gramíneas de verão na produção de trigo

Palavras chave: Carbono Orgânico; Índice de recalitrância; seqüências de culturas

Introducción

El uso de la tierra resulta en un rápido descenso del carbono orgánico (CO) del suelo ([Davidson y Ackerman, 1993](#)) y estas pérdidas se atribuyen mayormente a la reducción de las entradas de materia orgánica (MO), al aumento de la descomposición de residuos de cosecha y a la disminución de la protección física con las labranzas ([Jiang et al., 2011](#)). La capacidad de medir el C acumulado en los suelos en sus diferentes fracciones es importante para entender el ciclado de los ecosistemas terrestres ([Ellert et al., 2001](#)). En este contexto los ensayos de larga duración permiten hacer un seguimiento de las variaciones que se producen en los rendimientos y parámetros de calidad de los cultivos así como también la dinámica de las variables edáficas a través de los años y brindan valiosa información respecto a la estabilidad del sistema en el largo plazo.

En el CO del suelo se pueden encontrar fracciones con diferente grado de labilidad y una fracción estable o resistente. Las fracciones lábiles son fácilmente mineralizables, con rápido tiempo de renovación ([Krull et al., 2003](#)), y la estable sería la persistente en el suelo en escala de decenas de años ([Baisden y Amundson, 2003](#); [Bruun et al., 2007](#)). Esta fracción resistente se puede definir como la que se pierde lentamente luego del cultivo del suelo y que aumenta proporcionalmente a medida que el CO total disminuye. Las fracciones orgánicas lábiles son más sensibles a los efectos del uso de la tierra, y pueden utilizarse como indicadores tempranos del efecto de la rotación de cultivos, de la fertilización o del sistema de labranza sobre la calidad del suelo ([Haynes, 2000](#); [Six et al., 2002](#)). La facilidad con que se descomponga (o labilidad) de cada uno de estos compartimentos dependerá de la composición química, de la relación C:N, del estado de humificación y de su posición dentro de la matriz del suelo ([Golchin et al., 1995](#)). La variación de las fracciones lábiles será muy difícil de detectar si se analiza la MO total del suelo, ya que si bien representan la parte más activa, son sólo una pequeña parte del total. La MO del suelo está estrechamente ligada a la capacidad del suelo de mineralizar N, debido a esto el N incubado anaeróbico

(Nan) o N potencialmente mineralizable, se usa como una alternativa rápida y precisa para estimar la capacidad del suelo de mineralizar N y su relación con las fracciones particuladas ([Studdert *et al.*, 2017](#)).

Los métodos de fraccionamiento físico separan fracciones orgánicas con diferente labilidad: muy lábiles como el Carbono Orgánico Particulado (COP) y el más resistente, que es el Carbono Orgánico asociado a la fracción Mineral (COM) ([Galantini y Suñer, 2008](#)). Autores como Pandey *et al.* (2014) se refieren a la recalcitrancia química como la resistencia del suelo a las pérdidas bajo tratamientos químicos específicos. Uno de ellos, la hidrólisis ácida con HCl ([Plante *et al.*, 2006](#)), es un procedimiento común para obtener las fracciones lábiles y recalcitrantes del suelo. El reflujó de las muestras en ácido clorhídrico remueve químicamente los materiales lábiles como proteínas, ác. nucleicos y polisacáridos, dejando compuestos más resistentes como compuestos aromáticos, humificados o alifáticos de cadenas largas. Paul *et al.* (2006) mostraron que la cantidad de C de estas fracciones difiere significativamente y que su análisis puede ayudar a entender la contribución de distintas formas de C. Este procedimiento ha sido aplicado en numerosos estudios de modelado y de fraccionamiento de la materia orgánica del suelo ([Rovira y Vallejo, 2007](#)). La fracción no hidrolizable representa la fracción recalcitrante y su tamaño respecto al C total del suelo se denomina “Índice de Recalcitrancia” (IR) ([Rovira y Vallejo, 2002](#)). Estos mismos autores argumentaron que el IR puede utilizarse como indicador global de la calidad y estabilidad del CO del suelo. Los cambios del CO asociado a la fracción mineral (COM) con el paso del tiempo no van a ser iguales que los ocurridos con la fracción recalcitrante (COR).

Para reflejar los efectos del continuo avance agrícola sobre los sistemas productivos regionales y la masiva incorporación en las secuencias de los cultivos de cosecha gruesa, se diagramó hace 24 años un ensayo de agricultura permanente con labranzas en un suelo de la región pampeana ([Forján, 2012](#)). En esta etapa del estudio se plantearon los siguientes objetivos: 1) determinar el efecto de la rotación de cultivos y de la fertilización con N histórica acumulada, sobre las fracciones orgánicas de C y N, 2) evaluar los cambios en el contenido de las fracciones orgánicas con distinto grado de recalcitrancia (COM y COR) y calcular el Índice de Recalcitrancia de Carbono (IRC) e Índice de Recalcitrancia de Nitrógeno (IRN), 3) evaluar la labilidad del C a través de las relaciones entre algunas fracciones de C y 4) estudiar el Nan para conocer la capacidad del suelo de aportar N.

Materiales y Métodos

El sitio experimental está ubicado en la Chacra Experimental Integrada Barrow (38°20'S – 60°13'O) en el centro-sur bonaerense de Argentina. El ensayo “*agricultura permanente con labranza*” comenzó en 1993 con 6 secuencias de cultivos con diferentes proporciones de cultivos de cosecha fina/cosecha gruesa en un suelo Paleudol Petrocálcico con una profundidad efectiva de 70 cm. (Tabla 1) (Forján, 2012). Se tomó como suelo de referencia, el correspondiente a una pastura antigua de alfalfa y pasto ovillo (más de 20 años) ubicado al lado del sitio del ensayo.

Tabla 1. Esquema de las secuencias del Ensayo Agricultura permanente con labranza.

	1993	1994	1995
1er.Ciclo			
2do.Ciclo		2000	2001
3er.Ciclo		2006	2007
4to.Ciclo		2012	2013
Secuencia			
M/T/M/T/M/T	T	M	T
G/T/G/T/G/T	T	G	T
S/T/S/T/S/T	T	S	T
G/T/T/G/T/T	T	G	T
M/S/T/M/S/T	T	M	S
M/G/T/M/G/T	T	M	G
T/T/T/T/T/T	T	T	T

El diseño experimental fue de 3 bloques completos aleatorizados. Las muestras de suelo se obtuvieron en el año 2015 sobre el rastrojo del trigo (Secuencias 1, 2 y 3), a una profundidad de 0-20 cm. Las labranzas empleadas se ajustaron a los cambios productivos ocurridos en la región: en los primeros años se usó arado de rejas, rastra de discos y rastra de dientes; en años posteriores arado cincel, rastra de discos y cultivador y en la etapa final rastra de discos (2) y cultivador. En todas las secuencias estuvo presente el trigo (*Triticum aestivum* L.) como cultivo representativo de los cereales de invierno. Las variaciones estuvieron dadas por la presencia y/o repetitividad de los cultivos de verano. Las secuencias evaluadas en este estudio fueron: 1-T/M; 2-T/G; 3-T/S (T: Trigo – M: Maíz – G: Girasol – S: Soja). La secuencia 1 representó la inclusión de dos gramíneas que aportarían elevados volúmenes de rastrojos favoreciendo los niveles de MO del suelo. La secuencia

2 fue la comúnmente utilizada en la región debido a la favorable adaptación que tienen el trigo y el girasol a sembrarse en forma intercalada y la secuencia 3 intentó ejemplificar una situación de mayor agresión hacia el sistema de producción, ya que el escaso aporte de rastrojo producido por la soja y su repetitividad en el tiempo sobre un mismo suelo, produciría una agresión sobre las variables edáficas en general y sobre los niveles de las fracciones orgánicas en particular. Para T y M se fertilizó a la siembra con la dosis promedió de 80 kg ha⁻¹ de fosfato diamónico (PDA) y para las oleaginosas 40 kg ha⁻¹ (G) y 70 kg ha⁻¹ (S) de PDA también a la siembra. En todos los casos se realizó un posterior aporte de 140 kg N ha⁻¹ en forma de urea. En la fecha de muestreo las secuencias 1, 2 y 3 tenían trigo. Al final del ciclo 2015, se cosechó el trigo y se evaluaron las variables de rendimiento y calidad del cultivo.

Las muestras de suelo fueron secadas al aire y tamizadas con malla de 2 mm. A partir de éstas se realizó el fraccionamiento por tamaño de partícula ([Duval et al., 2013](#)). En cada fracción de suelo y en el suelo entero, se determinó el CO total (COT) por combustión seca a 1500 °C, con analizador automático LECO C Analyser y nitrógeno total (NT) por el método de Kjeldahl, ([Bremner, 1996](#)). Las fracciones obtenidas fueron las siguientes: COPg (tamaño de partícula entre 2000 y 105 µm), COPf (105-53 µm) y COM (< 53 µm). Las fracciones de N se identificaron como nitrógeno particulado fino (NPf), nitrógeno particulado grueso (NPg) y nitrógeno en la materia orgánica asociada a la fracción mineral (N-MOM). El suelo de la fracción fina (FF) se sometió a hidrólisis ácida de acuerdo al método descrito por Paul *et al.* ([1997](#)). Se asumió que esta fracción no hidrolizada contenía solamente la porción recalcitrante del suelo. Se obtuvieron las siguientes fracciones: carbono orgánico recalcitrante (COR) y carbono orgánico hidrolizado (COH). En el mismo residuo no hidrolizado, se determinó el Nitrógeno total recalcitrante (NR) por el método ya mencionado. El grado de recalcitrancia se expresó como Índice de Recalcitrancia de C e Índice de Recalcitrancia de N.

$$\text{IRC (\%)} = \text{C no hidrolizado (COR)/COT} * 100$$

$$\text{IRN (\%)} = \text{N no hidrolizado (NR)/NT} * 100$$

Se calculó el Índice de Labilidad a partir de la relación entre el Carbono Lábil y el Carbono total ([Toledo et al., 2013](#)).

$$\text{Índice de Labilidad} = (\text{COPg} + \text{COPf}) / \text{COT} * 100$$

La determinación de Nan se realizó sobre las muestras de suelo con el método de la incubación corta a 40 °C durante 7 días ([Martínez et al., 2017](#)). La determinación del N-NH₄⁺ liberado durante la incubación se determinó siguiendo la técnica de Mulvaney ([1996](#)). Para expresar los datos de Nan en kg ha⁻¹ se usó una densidad aparente de 1,30 Mg m⁻³.

El efecto de las variables rotación, fertilización nitrogenada del trigo y la interacción, se evaluó mediante ANOVA. Cuando existieron diferencias entre tratamientos, se calculó la diferencia mínima significativa (DMS) con un nivel de probabilidad de p<0,05.

Se realizó el análisis multivariado de componentes principales (ACP) para observar la relación global de todas las fracciones orgánicas estandarizadas en las rotaciones según la matriz de correlación. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el software Infostat ([Di Rienzo et al., 2013](#)).

Resultados

Carbono Orgánico y sus fracciones

Las tres secuencias estudiadas presentaron niveles de COT similares (21- 24 g kg⁻¹), aunque las diferencias fueron estadísticamente significativas (p< 0,05). La fertilización nitrogenada del trigo y la secuencia de cultivos no mostraron interacción significativa, lo que indicaría que hubo una tendencia similar en cada sistema a la aplicación de N. En todos los casos las 3 rotaciones mostraron niveles de COT muy inferiores al suelo de referencia mostrando una disminución entre el 18 % y el 33% luego de 22 años de cultivos de cosecha. Las secuencias con presencia de oleaginosas (tanto soja como girasol), fueron las que de mayor impacto sobre la caída del CO del suelo, independientemente de la cantidad de residuos que aportaron las mismas. En el caso de S/T esta caída llegó al 33,2 % (diferencia entre 28,9 g kg⁻¹ de COT de la pastura de referencia y 21,7 g kg⁻¹ de COT de la secuencia S/T, valor promedio entre 0 y 140 N).

De las fracciones de C lábiles (COPg, COPf y COH), el COPg y el COH, mostraron la misma tendencia que el COT, con diferencias significativas entre las secuencias de cultivos (M/T>G/T>S/T, p<0,05 para el COPg y la misma secuencia para COH, p<0,001) sin efecto por la fertilización. Nuevamente en la secuencia M/T se determinaron valores más elevados diferenciándose significativamente de las demás ([Tabla 2](#)). Los índices

de labilidad (valores no mostrados) fueron muy similares entre las secuencias, oscilando entre 16 y 18%. Estos porcentajes indicarían que del total del carbono del suelo, menos del 20% correspondería a la fracción activa, la cual participaría en el aporte de nutrientes a corto plazo. La rotación M/T mostró los valores más elevados entre las secuencias (18%).

La fertilización nitrogenada produjo cambios de los valores del COPg en todas las secuencias. El COPf y COM no mostraron cambios debidos a la fertilización ni a las secuencias de cultivos. De la misma forma, la fracción más resistente del COM, el COR, no mostró cambios significativos para las variables analizadas.

El IRC no mostró efectos por la fertilización, informándose los menores valores para el suelo con la pastura de referencia (IRC=49,6). Entre las secuencia de cultivo, el M/T mostró los valores más bajos (IRC=55), significativamente diferentes ($p<0,05$) a G/T y S/T. La secuencia M/T aumentó 11,3% respecto a la pastura de referencia, G/T 24,8% y S/T 27%.

Tabla 2. Carbono Orgánico total (COT), carbono orgánico particulado grueso (COPg), fino (COPf), mineral (COM), recalcitrante (COR), hidrolizado (COH) e Índice de Recalcitrancia de carbono (IRC) en 3 secuencias de cultivos y dos niveles de fertilización con N.

	COT	COPf	COPg	CO
	g k			
Maíz/				
0 N	23,0	3,2	1,1	
140 N	25,6	3,0	1,4	
Giraso				
0 N	24,4	3,0	0,7	
140 N	23,5	3,0	1,3	
Soja/				
0 N	21,9	2,7	1,0	
140 N	21,5	2,4	0,8	
Pastura de				
0 N	28,9	5,2	2,0	
ANC				
Rotación	x	ns	x	
Fert.	ns	ns	ns	
Rot. x Fert.	ns	ns	ns	

*, ** y *** indican diferencia estadísticamente significativa al 0,1

Fracciones de Nitrógeno y Nan

El suelo en las secuencias estudiadas presentó iguales niveles de NT ($2,1 \text{ g kg}^{-1}$) sin diferencias significativas por efecto de las secuencias ni de la fertilización. En el caso de las demás fracciones orgánicas de N tampoco se detectaron diferencias, salvo en el NPf que

disminuyó 50 % en la rotación S/T ($0,2 \text{ g kg}^{-1}$, $p < 0,001$) respecto a M/T y G/T ($0,30 \text{ g kg}^{-1}$) y también con el agregado de N (Figura 1). En las demás fracciones (excepto en el NR), los valores fueron inferiores al suelo de referencia ($0,50 \text{ g kg}^{-1}$). El NPg osciló entre $0,10$ y $0,30 \text{ g kg}^{-1}$, pero sin diferencias significativas y el N-MOM entre $1,5$ y $1,9 \text{ g kg}^{-1}$. Nuevamente, como en el caso del COR, la fracción estable de N (NR) no se modificó por el manejo de los cultivos en las distintas secuencias; en todos los casos el valor fue de $0,7 \text{ g kg}^{-1}$. En el caso del Nan, se hallaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) solamente por efecto de las rotaciones. La secuencia S/T mostró valores de Nan de $135,8 \text{ mg kg}^{-1}$, superiores a M/T y G/T ($61,8$ y $83,8 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente).

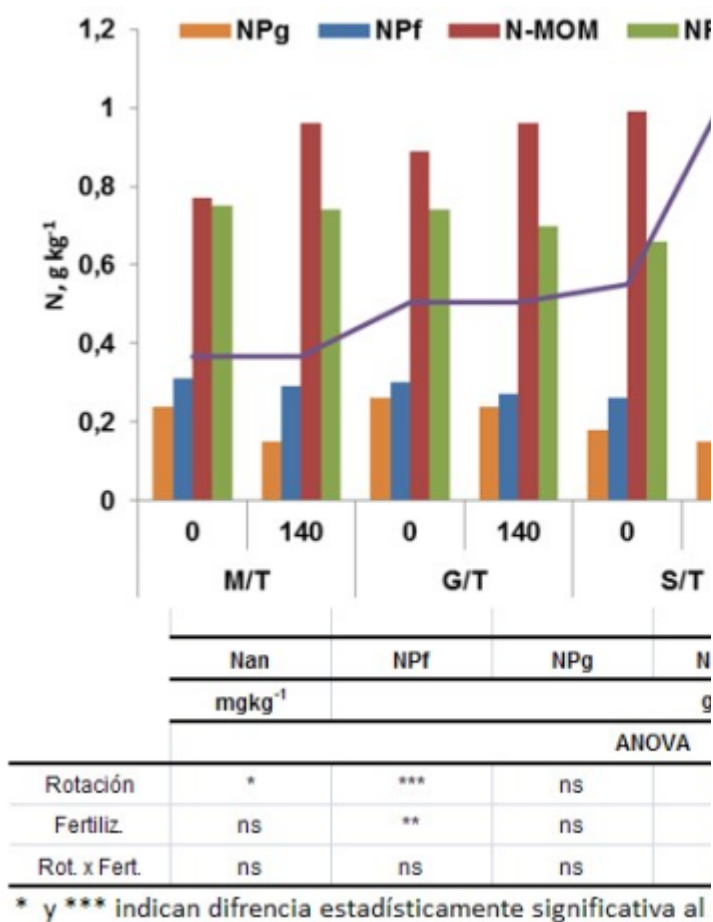


Figura 1. Nitrógeno particulado grueso (NPg), fino (NPf), nitrógeno en la materia orgánica asociada a la fracción mineral (N-MOM), nitrógeno recalcitrante (NR) y nitrógeno incubado anaeróbico (Nan) en tres secuencias de cultivos y dos niveles de fertilización con N.

Como forma de visualizar la interacción de todas las fracciones orgánicas de C y de N combinadas en las tres secuencias de cultivo estudiadas, se realizó un

Análisis de Componentes Principales (ACP) ([Figura 2](#)). Para este análisis se utilizaron los datos promedio entre las parcelas testigo y las fertilizadas. Este análisis permite construir ejes artificiales llamados CP, que permiten obtener gráficos de dispersión de observaciones y/o variables no correlacionadas ([Landriscini et al., 2015](#)). Cada variable está representada por un autovector que queda definido por la correlación que existe entre ésta y la CP considerada. El ángulo existente entre los vectores representa el grado de correlación entre las variables medidas.

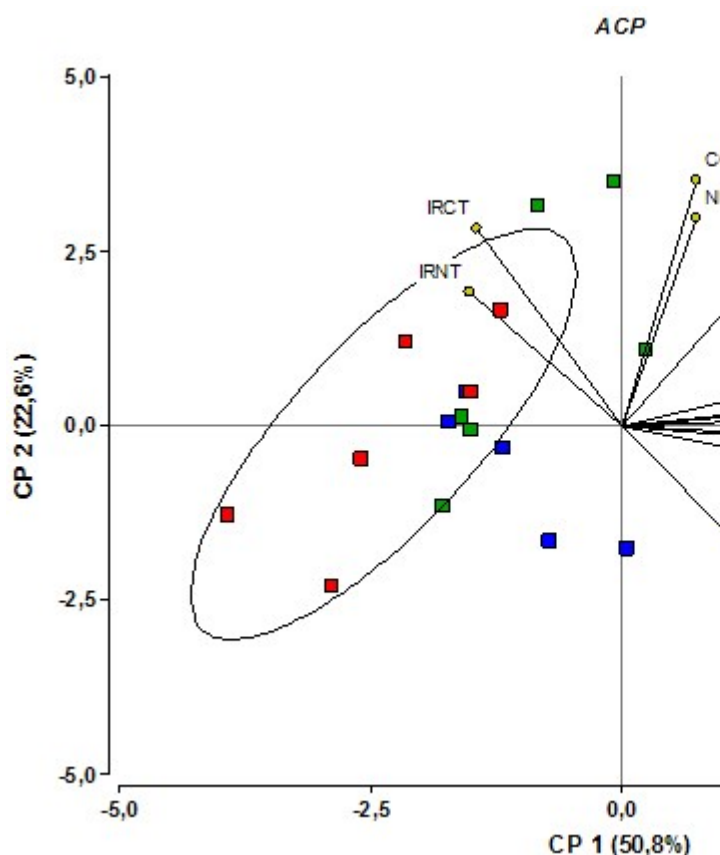


Figura 2. Gráfico Biplot generado a partir del análisis de componentes principales (ACP) utilizando las fracciones orgánicas de carbono y nitrógeno del suelo en tres secuencias de cultivos.

Círculo con puntos rojos corresponde a datos generados por la rotación S/T y círculo con puntos negros corresponden al suelo de referencia con pastura. El resto de los puntos, verdes y azules corresponden a las rotaciones G/T y M/T respectivamente.

En general, para las fracciones de C y de N se obtuvo una explicación total de la varianza de 73 %. El CP 1 explicó la mayor parte de esta varianza (50,8 %). Las variables que lo formaron fueron las positivas, como el caso de las fracciones lábiles de C y de N (COPg, COPf y NPf) y de otras más estables como el COT, NT y N-MOM, explicado por la longitud de sus vectores y el paralelismo con este CP. Esto indicaría que estas fracciones serían las que estarían mejor correlacionadas

en un análisis global. En el caso del CP 2, las variables más importantes, con una explicación de la varianza de 22,6 %, fueron las fracciones más estables del C y N (COR, NR, COM y los Índices de Recalcitrancia de C y de N). Estas variables estarían menos asociadas cuando se realizan estos gráficos de dispersión de datos.

En la [Figura 2](#), el gráfico Bi-plot representó gráficamente las variables medidas en un mismo plano, observándose 2 agrupamientos de puntos bien diferenciados: los puntos correspondientes al suelo de referencia con una pastura antigua y los pertenecientes a la secuencia S/T, con mayor susceptibilidad a la degradación, proveniente de los valores observados para el IRC. Los puntos de las demás secuencias estuvieron más dispersos y ubicados en el medio de estos dos grupos.

Producción y calidad del trigo

En las evaluaciones realizadas en el trigo, los rendimientos en grano resultaron estadísticamente superior con los antecesores girasol y soja ($p < 0,05$) respecto al maíz, con respuesta significativa a la fertilización con N del trigo ($p < 0,001$), sin interacción significativa ([Figura 3](#)). En la secuencia M/T la respuesta fue de 2381 kg ha⁻¹, en G/T 2513 kg ha⁻¹ y en S/T 2222 kg ha⁻¹. En el caso de los lotes testigo, los rendimientos promedio fueron 3244 kg ha⁻¹ sin diferencias significativas entre las secuencias y entre los fertilizados 5572 kg ha⁻¹, diferenciándose el antecesor soja del maíz y el girasol.

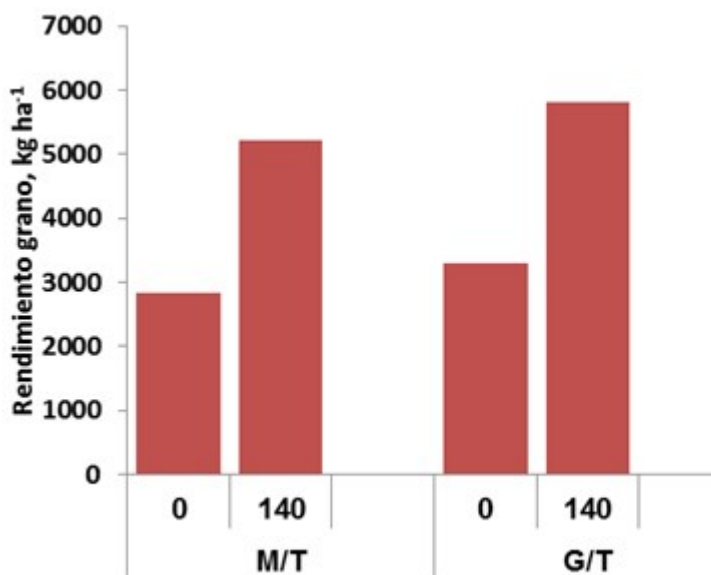


Figura 3. Rendimiento de grano de trigo en tres secuencias de cultivo y dos niveles de fertilización.

En el análisis de la proteína en grano, el antecesor soja fue significativamente menor que el maíz y el girasol

(en promedio, 7,3 % vs 8,7 y 9,0 respectivamente) ($p < 0,001$). Con la fertilización nitrogenada, las diferencias fueron nuevamente estadísticamente significativas (6,4 % vs 10,3 %, $p < 0,001$). Las secuencias 1 (M/T) y 2 (G/T) no presentaron diferencias (11,1 % en promedio), en tanto en la 3, S/T, el grano de trigo registró un valor muy inferior y estadísticamente significativo (8,3 %) al establecido por las normas de calidad para la comercialización del cereal (11,5 %).

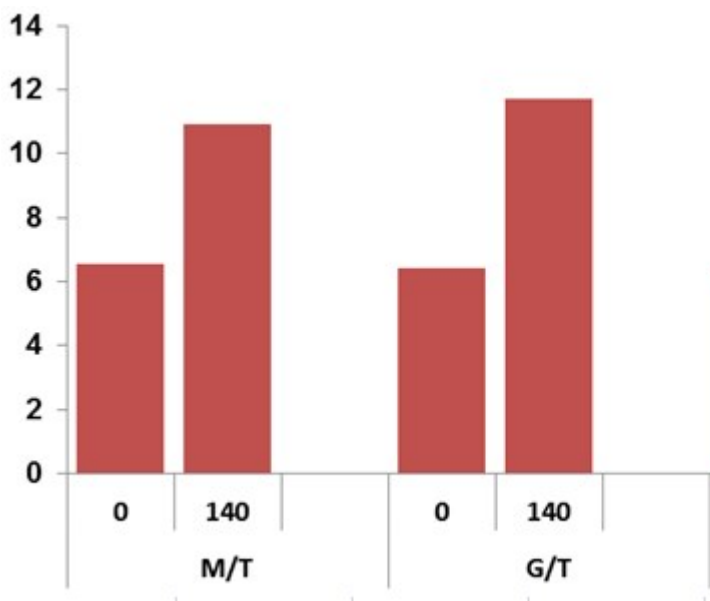


Figura 4. Porcentaje de proteína engrano de trigo en tres secuencias de cultivo y dos niveles de fertilización.

El N total absorbido por el trigo osciló entre 56 kg N ha⁻¹ para las parcelas testigo, significativamente diferentes ($p < 0,0001$) a las fertilizadas con N (148 kg N ha⁻¹). El antecesor girasol (G/T) mostró los mayores valores (111 kg ha⁻¹), significativamente diferentes al maíz (M/T) y soja (S/T) ($p < 0,01$).

Se observó una relación altamente significativa ($p < 0,001$) entre las variables N absorbido (N en grano + N en paja) y N disponible durante el ciclo (N_{an}, kg ha⁻¹ + 140 kg N ha⁻¹), con un ajuste del 76 % (Figura 5).

La ecuación de regresión resultó: N absorbido = 0,2721 (N disponible) + 7,5996

$$R^2 = 0,7594***$$

Usando esta ecuación de regresión lineal simple, se podría inferir que por cada kg de N disponible el cultivo absorbería alrededor de 0,3 kg de N.

La eficiencia de aprovechamiento del N (N total absorbido por la planta dividido el N disponible del suelo más del fertilizante, multiplicado por 100), fue de 30% en promedio para todos los antecesores y fertilización, siendo el trigo con antecesor maíz el que mostró valores más elevados (36%).

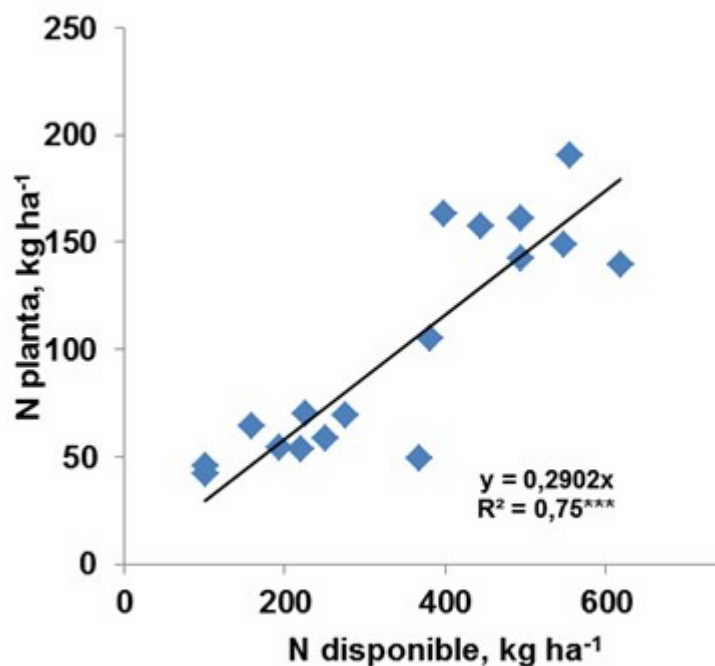


Figura 5. Regresión lineal entre valores de absorción de N en planta (grano + paja) y N disponible (N_{an} + N fertilizante).

Discusión

Existe una relación directa entre la cantidad de residuo vegetal aportado anualmente y el cambio en el nivel de MO edáfica ([Andriulo y Cordone, 1998](#)). Las distintas combinaciones de cultivos aportaron diferentes cantidades de residuos al suelo; en el caso de la secuencia M/T, la mayor frecuencia de cultivos con mayor volumen de rastrojo (datos no mostrados), condujo a mayores valores de CO del suelo sin respuesta significativa a la fertilización continua del trigo durante el ensayo de larga duración. La reducción de los períodos de barbecho y la incorporación de gramíneas (maíz) a la secuencia, permitiría un mayor enriquecimiento de COT y COP y posiblemente una mayor capacidad de suministrar N en los suelos asociado a sus sistemas radiculares extendidos y a la mayor producción de biomasa de residuos a través del año de estas especies ([Studdert et al., 2000](#), [Duval, et al., 2015](#)). La presencia de gramíneas aporta importantes cantidades de rastrojo con alta relación C:N favoreciendo la posterior formación de MO. Diferente fue el caso de la secuencia G/T, con menor volumen de rastrojos y de la rotación de leguminosa y gramínea (S/T). Esta última mostró la menor

acumulación de residuos con baja relación C:N y rápida descomposición con la labranza convencional, ocasionando los menores niveles de CO del suelo sin respuesta al N aplicado.

Las prácticas agrícolas continuas produjeron un descenso en los valores del COT respecto al suelo de referencia. En esta pastura, con características similares a un ambiente natural, el COT fue más elevado que en los suelos cultivados anualmente reflejando la mayor masa de raíces y biomasa aérea de plantas que existen bajo los suelos de condición prístina.

La falta de diferencia observada con la fracción más estable del CO, el COM, indicaría que es menos sensible a los cambios de manejo en el corto o largo plazo. Caso contrario la fracción más lábil, el COPg, tuvo variaciones con las secuencias de cultivos debido a la presencia de residuos de los cultivos de diferente cantidad y calidad. Duval y colaboradores (2013) trabajando en diferentes suelos de la región pampeana de Argentina, encontraron resultados similares donde el carbono orgánico particulado y el carbono de los carbohidratos, entre otros, fueron más sensibles a los cambios de los cultivos y a las prácticas de manejo.

En el caso de las secuencias con gramíneas el Índice de labilidad también corroboró este comportamiento, siguiendo la secuencia M/T>G/T>S/T. Las gramíneas aportarían mayor cantidad de residuos que actuarían como protectores de la mineralización rápida en el suelo. En contrapartida los residuos de soja favorecerían la descomposición. Trabajos anteriores con la incorporación de cultivos de cobertura en suelos de Santa Fé (Duval *et al.*, 2016), corroboraron que la labilidad del suelo aumentaba con la acumulación superficial de residuos que iban a formar parte rápidamente de la materia orgánica particulada del suelo.

En el caso del COR estaría formado por moléculas orgánicas más resistentes a la degradación, las que resultan estables en el tiempo y pueden ser consideradas como la mínima cantidad de carbono que puede almacenar el suelo. La presencia de cultivos de verano, cuyos residuos presentan menores relaciones C:N, y donde la mineralización del C no sería compensada con el mayor aporte de residuos, podría asociarse a una mayor susceptibilidad a la degradación química. Todas las secuencias de cultivo mostraron Índices de Recalcitrancia de C superiores al suelo de referencia, siendo la secuencia M/T la que mostraría mayor estabilidad del CO del suelo, ocasionando menor susceptibilidad a la degradación química.

Los valores de las fracciones lábiles de N del suelo, mostraron que sólo el NPf cambió por la inclusión de soja como cultivo de verano en las secuencias con trigo. Como era de esperar la fracción más lábil del N disminuyó en la secuencia con soja debido a la naturaleza de este cultivo generando alta disponibilidad en el suelo y condiciones para una rápida mineralización ([Landriscini et al., 2019](#)). Autores como San Emeterio y colaboradores ([2014](#)), encontraron que en agricultura sostenible los efectos de diferentes incorporaciones de C sobre la disponibilidad de N del suelo fueron evidente en cortos períodos, lo que destaca cómo las comunidades microbianas del suelo son importantes en la consideración de la calidad de las fuentes de C al modelar el ciclo del N terrestre en prácticas de manejo de cultivos. El resto de las fracciones no fueron sensibles a los cambios de manejo. La labranza continua durante más de 20 años podría estar asociada a la falta de diferencias entre las secuencias. El NR por su composición química representaría una proporción consistente del nitrógeno total del suelo sin evidenciar cambios producidos por los residuos de los cultivos integrantes de la secuencia. Autores como Azam y colaboradores ([1989](#)) en un estudio de fijación no biológica de N₂ en suelos, observaron que alrededor del 10% del N₂ incorporado a la materia orgánica se convirtió en resistente a la hidrólisis ácida con HCl 6 N. Teniendo en cuenta las proporciones relativas de COR y NR en relación al COT y NT, se observó que el C fue más resistente a la hidrólisis ácida con respecto al N, en coincidencia a lo hallado por Rovira y Vallejo ([2002](#)).

En el caso del Nan, el N aportado por los residuos de soja fue mayor a los provenientes de maíz y girasol. Estos residuos con baja relación C:N, serían los responsables de una mayor tasa de mineralización cuando se devuelven al suelo. Por lo que el N potencialmente mineralizable resultó ser un indicador más sensible ante diferencias edáficas producidas por los diferentes cultivos. Autores como Martínez *et al.* ([2015](#)) encontraron correlaciones positivas entre el Nan y las fracciones lábiles de C y de N, para suelos del SOB

Globalmente el ACP demostró que principalmente las fracciones orgánicas más lábiles del C y del N tendrían una mayor relación con los suelos usados como referencia, en este estudio una pastura antigua lindante al ensayo. Como contrapartida la agricultura continua, expresada a través de tres secuencias intensivas de cultivos de verano e invierno y por consecuencia con mayor susceptibilidad a la degradación del suelo, se

relacionaría con las fracciones más estables de C y N. En 2013, Duval y colaboradores ([2013](#)) trabajando en suelos de la región pampeana, encontraron que la actividad agrícola produjo una significativa caída de los niveles del CO del suelo. El efecto de las prácticas de manejo sobre el CO no fue detectado, sin embargo se encontraron diferencias en las fracciones particuladas.

Se repite la tendencia que los cultivos oleaginosos resultan ser mejores antecesores que las gramíneas de verano en el rendimiento posterior del trigo. Esta visión se ve confirmada en los tratamientos testigo. Con la fertilización se lograron importantes incrementos en ambos parámetros para los tres tratamientos, atenuándose el efecto antecesor. En estos sistemas de producción se deben tener en cuenta diferentes variables como el rendimiento de los cultivos antecesores, el volumen de rastrojo incorporado, el nivel de materia orgánica del suelo, etc. ([Forjan et al., 2016](#)).

La proteína del grano resultó muy baja para todos los tratamientos cuando no se fertilizó y ante el agregado de N para los antecesores maíz y girasol alcanzando valores cercanos a los límites requeridos para la comercialización. En cambio con antecesor soja el valor alcanzado resultó aún bajo confirmando los balances negativos de nitrógeno que produce la presencia de soja en el sistema. Es sabido que la relación entre el rendimiento y el contenido de proteína en grano depende de la disponibilidad de N. Frente a una alta disponibilidad de N producida por el cultivo de soja, la fertilización con este nutriente provoca solamente un efecto sobre la concentración de proteína en grano ([Reussi Calvo et al., 2006](#)). Este efecto fue corroborado cuando el N se expresó como kg N ha^{-1} cosechada. El trigo con antecesor girasol aumentó significativamente respecto al antecesor maíz y soja ($p < 0,05$).

La relación entre la absorción de N en planta y la disponibilidad para el cultivo confirmaron que la eficiencia de aprovechamiento del N en trigo dependerá de los cultivos antecesores, en especial de la relación gramínea-leguminosa presentes en la rotación y también de incluir en el diagnóstico el N disponible total del suelo y no solo el N a la siembra. En el caso del antecesor maíz en la rotación, la fertilización del trigo no mejoró sino contrariamente disminuyó la eficiencia de aprovechamiento del N disponible. Martínez y colaboradores ([2017](#)) encontraron en suelos del sudoeste bonaerense, que el mayor contenido de las fracciones de nitrógeno orgánico del suelo bajo siembra directa, estuvieron asociadas con el alto potencial de

mineralización. Sin embargo esto no resultó en incrementos del N disponible y de la absorción de N por el trigo, debido a las condiciones climáticas durante la estación de crecimiento. Estas fracciones estuvieron muy influenciadas por la acumulación de residuos del cultivo antecesor y por las condiciones climáticas durante el barbecho. Así mismo probaron que el N potencialmente mineralizable estuvo influenciado positivamente por la cantidad y calidad de las fracciones particuladas de C.

Conclusiones

La secuencia de cultivos a base de gramíneas y leguminosas modificaron los niveles del CO del suelo, luego de 22 años de agricultura continua con laboreo convencional.

A través del Índice de Recalcitrancia se estableció que la secuencia con gramíneas mostró la mayor estabilidad del CO del suelo, con menor susceptibilidad a la degradación química. También en ésta secuencia, la mayor cantidad de residuos acumulada, derivó en una mayor relación de las fracciones lábiles de C, respecto al C total del suelo, observado en el Índice de Labilidad de C.

El suelo de la rotación con soja mostró la mayor la capacidad de aportar N para el cultivo siguiente.

Bibliografía

01. ANDRIULO, A.E.; CORDONE, G. (1998). Impacto de labranzas y rotaciones sobre la materia orgánica del suelo en la Región Pampeana Húmeda. En: Panigatti, J.L.; Marelli, H.; Buschiazzo, D.; Gil, R. (Eds.). *Siembra directa*. Hemisferio Sur, Bs. As., Arg., 65-96.
02. AZAM, F.; MULVANEY, R.L.; STEVENSON, F.J. (1989). Chemical distribution and transformations of non-symbiotically fixed ^{15}N in three soils. *Soil Biol. Biochem.* 21: 849-855.
03. BAISDEN, W.T.; AMUNDSON, R. (2003). An analytical approach to ecosystem biogeochemistry modeling. *Ecol. Applic.*, 13: 649-663.
04. BREMNER, J.M. (1996). Nitrogen Total. In: Sparks, D.L. (Ed.). *Methods of Soil Analysis*. Chemical Methods. Part 3. American Society of Agronomy Inc. Madison, Wisconsin, USA, 1085-1123.
05. BRUUN, S.; THOMSEN, I.K.; CHRISTENSEN, B.T.; JENSEN, L.S. (2007). In search of stable soil organic carbon fractions: a comparison of methods applied to soils labeled with ^{14}C for 40 days or 40 years. *Eur. J. Soil Sci.*, 59: 247-256.

06. DAVIDSON, E.A.; ACKERMAN, L. (1993). Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils. *Biogeochemistry*, 20: 161-193.
07. DI RIENZO, J.A.; CASANOVES, F.; BALZARINI, M.G.; GONZÁLEZ, L.; TABLADA, M.; ROBLEDO, C.W. (2013). InfoStat versión 2013. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.
08. DUVAL, M.E.; GALANTINI, J.A.; IGLESIAS, J.O.; CANELO, S.; MARTÍNEZ, J.M.; WALL, L. (2013). Analysis of organic fractions as indicators of soil quality under natural and cultivated systems. *Soil Tillage Res.*, 131: 11-19.
09. DUVAL, M.E.; MARTÍNEZ, J.M.; IGLESIAS, J.O.; GALANTINI, J.A.; WALL, L. (2015). Secuencia de cultivos y su efecto sobre las fracciones orgánicas del suelo. En: de Sá Pereyra, E.; Galantini, J.A., Minoldo, G. (Eds.). *Impacto de los sistemas actuales de cultivos sobre las propiedades químicas del suelo y sus efectos sobre los balances de carbono*. INTA, 51-55.
10. DUVAL, M.E.; GALANTINI, J.A.; CAPURRO, J.E.; MARTÍNEZ, J.M. (2016). Winter cover crops in soybean monoculture: Effects on soil organic carbon and its fractions. *Soil & Tillage Res.*, 161: 95-105.
11. ELLERT, B.H.; JANZEN, H.H.; MC CONKEY B.G. (2001). Measuring and comparing soil carbon storage. In: Lal, L.; Kimble, J.; Follett, R.; Stewart, B. (Eds.). *Assessment Methods for Soil Carbon*. Lewis. Publishers, 131-146.
12. FORJÁN, H.J. (2012). Historia de los ensayos de rotaciones de la Chacra Experimental Integrada Barrow. En: INTA (Ed.). *Rotaciones y secuencias de cultivos en la región mixta cerealera del centro-sur bonaerense. 30 Años de experiencia*, 18-19.
13. FORJÁN, H.J.; MANSO, M.L.; MOLFESE, E.; ASTIZ, V. (2016). Rotación de cultivos con labranzas. Producción de trigo pan. En: INTA (Ed.). *Actualización técnica en cultivos de cosecha fina 2015-2016*, 109-111.
14. GALANTINI, J.A.; SUÑER, L.G. (2008). Las fracciones orgánicas del suelo: análisis de los suelos de Argentina. *Agriscientia*, 25: 41-55.
15. GOLCHIN, A.; CLARKE, P.; OADES, J.M.; SKJEMSTAD, J.O. (1995). The effects of cultivation on the composition of organic-matter and structural stability of soils. *Aust. J. Soil Res.*, 33: 975- 993.
16. HAYNES, R.J. (2000). Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand. *Soil Biology & Biochemistry*, 32: 211-219.
17. JIANG, X.; WRIGHT, A.L.; WANG, J.; LI, Z. (2011). Long-term tillage effects on the distribution patterns of microbial biomass and activities within soil aggregates. *Catena*, 87: 2762-2780.

18. KRULL, E.S.; BALDOCK, J.A.; SKJEMSTAD, J.O. (2003). Importance of the analyses for modelling carbon turnover. *Funct. Plant Biol.*, 30: 207-222.
19. LANDRISCINI, M.R.; MARTÍNEZ, J.M.; GALANTINI, J.A. (2015). Fertilización foliar con nitrógeno en trigo en el sudoeste bonaerense. *Ci. Suelo*, 33: 183-196.
20. LANDRISCINI, M.R.; GALANTINI, J.A.; DUVAL, M.E.; CAPURRO, J.E. (2019). Nitrogen balance in a plant-soil system under different cover crop-soybean cropping in Argentina. *Applied Soil Ecology*, 133: 124-131.
21. MARTÍNEZ, J.M.; GALANTINI, J.A.; LÓPEZ, F.M. (2015). Indicadores de mineralización de nitrógeno en el sudoeste bonaerense: relación con las fracciones orgánicas del suelo. *Ciencias Agronómicas*, Año 15: 49-57.
22. MARTÍNEZ, J.M.; GALANTINI, J.A.; DUVAL, M.E.; LÓPEZ, F.M. (2017). Tillage effects on labile pools of soil organic nitrogen in a semi-humid climate of Argentina: A long-term field study. *Soil & Tillage Res.*, 169: 71-80
23. MULVANEY, R.L.(1996). Nitrogen-Inorganic forms. In: Sparks, D.L. *et al.* (Eds.). *Methods of Soil Analysis*. Part 3. Chemical Methods. ASA and SSSA, Madison, Wisc. 1123-1184.
24. PANDEY, D.; AGRAWAL, M.; BOHRA, J.S.; ADHYA, T.K.; BHATTACHARYYA, P. (2014). Recalcitrant and labile carbon pools in a sub-humid tropical soil under different tillage combinations: A case study of rice-wheat system. *Soil Tillage Res.*, 143: 116-122.
25. PAUL, E.A.; FOLLETT, R.F.; LEAVITT, S.W.; HALVORSON, A.; PETERSON, G.A.; LYON, D.J. (1997). Radiocarbon dating for determination of soil organic matter pool sizes and dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 1058-1067.
26. PAUL, E.A.; MORRIS, S.J.; CONANT, R.T.; PLANTE, A.F. (2006). Does the acid hydrolysis-incubation method measure meaningful soil organic carbon pools? *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61: 1058-1067.
27. PLANTE, A.F.; CONANT, R.T.; PAUL, E.A.; PAUSTIAN, K.; SIX, J. (2006). Acid hydrolysis of easily dispersed and microaggregate-derived silt- and clay-sized fractions to isolate resistant soil organic matter. *Eur. J. Soil Sci.* 57: 456-467.
28. REUSSI CALVO, N.; ECHEVERRÍA, H.; BARBIERI, P.; SAINZ ROZAS, H. (2006). Nitrógeno y Azufre en trigo: ¿rendimiento y proteína? *XX Congreso Argentino de la Ciencia Argentina. Rosario, Argentina.*
29. ROVIRA, P.; VALLEJO, V.R. (2002). Labile and recalcitrant pools of carbon and nitrogen in organic matter decomposing at different depths in soil: an acid hydrolysis approach. *Geoderma* 107: 109-141.
30. ROVIRA, P.; VALLEJO, V.R. (2007). Labile, recalcitrant, and inert organic matter in Mediterranean forest soils. *Soil Biol. & Bioch.*, 39: 202-215.

31. SAN EMETERIO, L.; CANALS, R.M.; HERMAN, D.J. (2014). Combined effects of labile and recalcitrant carbon on short-term availability of nitrogen in intensified arable soil. *European Journal of Soil Science*, 65: 377–385.
32. SIX, J.; CONANT, R.T.; PAUL, E.A.; PAUSTIAN, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant Soil* 241: 155–176.
33. STUDDERT, G.A.; ECHEVERRÍA, H. (2000). Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1496-1503.
34. STUDDERT, G.A.; DOMINGO, M.N.; GARCÍA, G.V.; MONTERUBBIANESI, M.G. (2017). Carbono orgánico del suelo bajo sistemas de cultivo contrastantes y su relación con la capacidad de proveer nitrógeno. *Ci Suelo* 35: 285-299.
35. TOLEDO, D.M.; GALANTINI, J.A.; FERRECCIO, E.; ARZUAGA, S.; GIMÉNEZ, L.; VÁZQUEZ, S. (2013). Indicadores e índices de calidad en suelos rojos bajo sistemas naturales y cultivados. *Ci Suelo* 31: 201-212.