

DISTRIBUCIÓN DE CARBONO Y NITRÓGENO ORGÁNICO EN FRACCIONES GRANULOMÉTRICAS DE SUELOS BAJO PASTIZALES, AGRICULTURA Y FORESTACIONES

PAULA FLORENCIA DI GERÓNIMO^{1-2*}, CECILIA DEL CARMEN VIDELA², PABLO LACLAU³

Recibido: 24/06/2017

Recibido con revisiones: 26/10/2017

Aceptado: 29/10/2017

RESUMEN

Los cambios en la vegetación y el uso del suelo modifican la dinámica del C y N edáficos. Objetivo: (1) estudiar las variaciones en C y N de la materia orgánica y sus fracciones granulométricas (MOP y MOAM), y (2) cómo afectan al N potencialmente mineralizable estimado (Nan) bajo diferentes usos del suelo. Los usos de la tierra analizados fueron: pastizal natural (PN), forestación con pinos (MP), franjas raleadas dentro de MP, para pastizal secundario (PS) y agricultura (AGR). En AGR se halló el menor valor de C orgánico total (COT), N total (Nt), de C y N en ambas fracciones y Nan, evidenciando procesos de degradación del suelo. En los sitios MP y PS se halló más COT (63,3 y 53,5 g Kg⁻¹, en promedio) con respecto a PN (50,4 g Kg⁻¹ suelo), en respuesta a un mayor carbono asociado a los minerales (C-MOAM). En PN se determinó más Nt, C-MOP y N-MOP que MP y PS. Esto explicó que este último sitio presentara más de 100 mg Kg⁻¹ suelo más Nan que MP y PS. N-MOP fue la variable que mejor explicó la variabilidad del Nan (R²=0,859). La distribución de C y N en la MO y sus fracciones reflejó los cambios en la vegetación, pero es necesario un mayor estudio de la dinámica del C y N bajo vegetación forestal.

Palabras clave: MOP, MOAM, relación C/N

ORGANIC C AND N DISTRIBUTION IN GRANULOMETRIC FRACTIONS OF SOILS FROM GRASSLANDS, AGRICULTURE AND FORESTATION

ABSTRACT

Changes in land use modify soil C and N dynamics. Our objectives were (1) to study C and N variations in the organic matter and its granulometric fractions (MOP and MOAM), and (2) to evaluate how these variations affect the potentially mineralizable N (Nan) under different land uses. Analyzed land uses were: grassland (PN), agriculture (AGR), forestation with pines (MP), and thinned strips in MP: secondary grassland (PS). We determined the lowest total organic carbon (COT), total N (Nt), C and N in granulometric fractions, and Nan values at AGR, evidencing soil degradation. The COT values at MP and PS (63,3 and 53,5 g kg⁻¹, respectively) were greater than at PN (50,4 g kg⁻¹ soil), due to an increase in C associated with minerals (C-MOAM). We observed more Nt, C-MOP and N-MOP at PN than at MP and P. This explained the fact that Nan was 100 mg Kg⁻¹ greater at PN than at MP and PS. The N-MOP was the variable that best explained Nan variability (R² = 0,859). The C and N distribution in the MO and its fractions reflected changes in land use, but it is necessary to better study C and N dynamics under forest vegetation.

Key words: MOP, MOAM, C/N relation

1 Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Bs As (CIC)

2 Universidad Nacional de Mar del Plata

3 Agencia de Extensión Rural San Martín de los Andes, INTA

* Autor de contacto: digeronimopaula@gmail.com

INTRODUCCIÓN

La materia orgánica (MO) del suelo es considerada un componente de fundamental importancia para el desarrollo de la agricultura. Es clave en los procesos de formación del suelo así como también en el desarrollo de la fertilidad del mismo, su estructuración (Six *et al.*, 2004), capacidad de infiltración y de retención hídrica (Doran y Parkin 1994), entre otras. La MO es sensible a las prácticas de manejo del suelo (Studdert & Echevarría, 2000), y a los cambios en el uso de tierra (Lal, 2004). Está íntimamente relacionada con las características edafoclimáticas de un sitio y afecta directa e indirectamente la estabilidad del sistema. Por ello es considerada como uno de los atributos más importantes para definir la calidad del suelo (Doran & Parkin, 1994).

Los cambios en la vegetación, asociados a un cambio en el uso de la tierra, tienen consecuencias directas en muchas propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, siendo la MO, uno de los parámetros más afectados (Lal, 2004). En el Sudeste de la provincia de Buenos Aires, el cambio en el uso de la tierra más notorio que se produjo en los últimos años, fue la "agriculturización". Este proceso implicó principalmente la eliminación de las pasturas de las rotaciones mixtas, con un aumento de la frecuencia del cultivo de soja y, en menor medida, el reemplazo de la vegetación nativa de pastizales naturales por agricultura (Manuel-Navarrete *et al.*, 2009). Por otra parte, en algunos piedemontes serranos, los pastizales fueron reemplazados por forestaciones, debido a las restricciones que estos sitios presentan para el uso agrícola y a la disponibilidad de planes gubernamentales de estímulo a la forestación. Posteriormente, en algunos sitios forestados, se produjo la reconversión de dichas forestaciones a sistemas silvopastoriles mediante el raleo de franjas de árboles con el objetivo de implantar pasturas en las áreas raleadas.

En relación al impacto de dichos cambios de vegetación sobre variables edáficas, está bien documentado que la conversión de vegetación nativa a agricultura provoca reducciones en el contenido de MO de los suelos (Lal, 2004; Sainz Rosas *et al.*, 2011), particularmente de sus fracciones lábiles (Sequeira *et al.*, 2011). En cuanto a la fo-

restación de pastizales, en revisiones bibliográficas que contemplaron un amplio rango de climas y suelos, se han encontrado tanto reducciones (Guo & Gifford, 2002) como aumentos en la MO (Eclesia *et al.*, 2012).

La MO es una mezcla altamente heterogénea de residuos vegetales y animales en distintos grados de descomposición y de materiales húmicos altamente resistentes (Jenkinson, 1988). Esta heterogeneidad determina la existencia de fracciones con diferente labilidad cuyo estudio ha resultado de mayor poder explicativo que el análisis de la MO como una fracción homogénea (Cambardella & Elliot, 1992, Tan *et al.*, 2007). El fraccionamiento físico por tamaño de partículas permite separar una fracción de tamaño mayor que 53 μm denominada materia orgánica particulada, de mayor labilidad (MOP), y una fracción menor que 53 μm , la materia orgánica asociada a los minerales limo y arcillas (MOAM), de mayor estabilidad (Cambardella & Elliot, 1992). Este método de fraccionamiento ha sido ampliamente utilizado para el estudio de suelos agrícolas (Six *et al.*, 1998, Fabrizzi *et al.*, 2003; Diovisalvi *et al.*, 2008; Domínguez *et al.*, 2009) pero no ha sido explorado en igual intensidad bajo suelos forestales (Eclesia *et al.*, 2012).

La distribución de C y nitrógeno (N) entre dichas fracciones, y más concretamente el contenido de N en la fracción MOP (N-MOP), está asociado a la capacidad del suelo de proveer N a los cultivos, ya que representa una fracción rápidamente mineralizable (Haynes 2005, Gregorich *et al.*, 2006). En relación a ello, el potencial de mineralización de N del suelo (N_0), puede ser estimado mediante la determinación del nitrógeno liberado en incubación anaeróbica de siete días (Nan) (Echevarría *et al.*, 2000). Este indicador ha sido ampliamente utilizado en suelos agrícolas, habiéndose demostrado una relación estrecha con el C-MOP (Fabrizzi *et al.*, 2003) y el N-MOP (Diovisalvi *et al.*, 2008, Gregorutti *et al.*, 2008).

Sin embargo, la cantidad de C y N de los residuos que se transforma en MO y posteriormente se estabiliza en cada fracción, depende de la interacción con la fracción mineral (protección física), el nivel de saturación de C del suelo y de la calidad del material vegetal, principalmente, de su relación C/N (Six *et al.*, 2002). A su vez, la

calidad depende de la vegetación predominante, dando lugar a diferente relación C/N en la MO (Mazzilli *et al.*, 2014, Castellano *et al.*, 2015). La relación C/N de la MO es uno de los principales indicadores de su calidad y ha sido utilizada para estudiar la liberación de N por mineralización (Whalen *et al.*, 2000).

Este trabajo se propuso estudiar, bajo condiciones edafoclimáticas comparables, (1) las variaciones en los contenidos de C y N y en la relación C/N de la MO y de sus fracciones granulométricas (MOP y MOAM), y (2) cómo afectan al N potencialmente mineralizable estimado (Nan) bajo diferentes usos del suelo. Se espera que la materia orgánica, y en mayor medida la MOP, refleje las diferencias de cantidad y calidad de aporte de residuos que implican dichas condiciones. Los usos del suelo estudiados fueron: 1) una forestación con pinos de 22 años cuyo uso previo fue pastizal natural, 2) Franjas dentro de la forestación donde se ralearon árboles tres años antes de este estudio y se permitió el crecimiento de especies nativas: pastizal secundario (PS), 3) un lote bajo rotación agrícola en siembra directa y, 4) una situación prístina bajo pastizal natural (PN).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se seleccionaron áreas con diferentes manejos, establecidos sobre suelos con características físico-químicas similares, ubicados en un establecimiento agropecuario localizado en el partido de Tandil, provincia de Buenos Aires (37°40'14" S; 59°4'49" W). Se identificó una forestación de pinos (*Pinus radiata* D. Don) de 22 años de antigüedad que se encuentra sobre un mosaico de suelos Argiudol Típico y Argiudol Vértico (Soil Survey Staff, 2014), pertenecientes a las series Tandil y Tres Esquinas, respectivamente (INTA, 2014). En el año 2011 (tres años antes del presente estudio), con el objetivo de realizar un manejo silvopastoril, en esta forestación se hicieron raleos generando franjas de árboles de 10 m de ancho (MP: monte de pinos). Las franjas quedaron separadas entre sí por 20 m, y en esta zona se permitió el crecimiento de especies nativas o naturalizadas, lo que constituyó el segundo sitio estudiado: PS (pastizal secundario). A fin de

comparar el efecto del manejo forestal con los manejos agrícolas habituales en la zona y con la situación prístina, se seleccionó un área adyacente bajo manejo agrícola con siembra directa (SD) por más de 20 años (AGR: agricultura). El suelo predominante en un 70% de esta área es Argiudol Típico (Soil Survey Staff, 2014) serie Tandil (INTA, 2014), mientras que en el 30% restante se encuentra un suelo Argiudol Petrocálcico (Soil Survey Staff, 2014) de la serie Azul (INTA, 2014). El sitio AGR está bajo rotación agrícola (girasol/soja/trigo-soja), en siembra directa desde hace más de 20 años, siendo manejado anteriormente con laboreo convencional. La última situación seleccionada fue un área de pastizal natural (PN: pastizal natural) adyacente con algunas limitaciones por la presencia de roca aflorante. En este sitio, alternan afloramientos rocosos, con suelo Hapludol Lítico (Soil Survey Staff, 2014), perteneciente a la serie Sierra de los Padres (INTA, 2014).

En la **Tabla 1** se presenta una descripción de los suelos de cada sitio. Es importante mencionar que los cuatro sitios analizados se encuentran distanciados entre sí no más de 300 metros, por lo que están sometidos a las mismas condiciones climáticas. La heterogeneidad del relieve en la zona fundamenta que en distancias tan cortas se presenten varias series de suelo, aunque todas provienen del mismo material parental (Loess). Se destaca que los mismos presentan valores similares de arcilla, entre 30 y 38 % y de COT, entre 39,2 y 44,6 g kg⁻¹ suelo en los primeros 20 cm del perfil (profundidad que se analizó en este estudio), a excepción de PN, cuyo COT es aproximadamente el doble que el del resto de los sitios. La gran similitud entre las características de suelo del estrato del perfil analizado entre los cuatro sitios, hace posible su comparación.

Muestreo, acondicionamiento y análisis de suelo

Se realizaron muestreos de suelo en las cuatro situaciones seleccionadas (MP, PS, PN y AGR), a dos profundidades: 0-5 y 5-20 cm. Se tomaron aleatoriamente tres muestras compuestas de al menos 20 sub-muestras en cada área experimental, siguiendo transectas con muestreos cada

Tabla 1: Descripción de los suelos en sitios bajo pastizal natural (PN), monte de pinos (MP), pastizal secundario (PS) y agricultura (AGR).**Table 1:** Description of soils under natural grassland (PN), pines forest (MP), secondary grassland (PS) and agriculture (AGR).

Sitio	PN	MP	PS	AGR
Serie	Sierra de los Padres	Tandil-Tres esquinas	Tandil-Tres esquinas	Tandil-Azul
Clasificación	Hapludol Lítico	Argiudol Típico-Argiudol Vértico	Argiudol Típico-Argiudol Vértico	Argiudol Típico-Argiudol petrocálcico
Años de agricultura en SD	-	-	-	>20
Rotación	-	-	-	Girasol/Soja/Trigo-Soja
C (g kg ⁻¹ suelo)	88,6	39,2-43*	39,2-43	39,2-44,6*
N (g kg ⁻¹ suelo)	7,4	3,2-3,3*	3,2-3,3*	3,2-3*
%As	32,8	29,4-30,7*	29,4-30,7*	29,4-30,3*
pH (1)	6,1	6,9-6,7*	6,9-6,7*	6,9-6,3*
pH (2)	5,97	5,37	5,57	5,72
Profundidad del Hz A	15	20-30*	20-30*	20-20*

Nota: Los datos fueron extraídos de la carta de suelos del INTA (INTA, 2014). Los datos de C, N, %As y pH (1), corresponden al horizonte A o Ap de cada suelo, que contempla la profundidad aquí analizada. * El primer valor de dichas celdas corresponde a la primera serie de suelo mencionada y el segundo a la restante. El valor pH (2) fue extraído de Di Gerónimo *et al.*, (2017), fue tomado en las mismas muestras de suelo que se analizaron para esta investigación y es un promedio ponderado de los valores de 0-5 y 5- 20 cm de suelo.

Note: Data were extracted from INTA's soil chart (INTA, 2014). The data of C, N, % As and pH (1) correspond to the horizon A or Ap of each soil, which contemplates the analyzed soil depth. *The first value of these cells corresponds to the first soil serie mentioned and the second one to the rest. The pH value (2) was extracted from Di Gerónimo *et al.*, (2017), was analyzed on same soil samples used on our investigation and represents average values between 0-5 and 5- 20 cm soil depths.

50 pasos de manera de lograr representatividad en cada sitio. Previo a la toma de cada muestra se eliminaron los residuos vegetales presentes en superficie, de modo que todos datos aquí presentados corresponden a horizontes minerales. Todas las muestras fueron secadas en estufa a 30°C, molidas y tamizadas con tamiz de 2 mm o 0,5 mm, según el análisis a realizar.

A las muestras de cada sitio experimental se les realizó un fraccionamiento físico por tamaño de partículas en dos fracciones: >53 μm , materia orgánica particulada (MOP) y <53 μm materia orgánica asociada a los minerales (MOAM) (Cambardella & Elliot, 1992). El contenido de carbono en la MOP (C-MOP), en la MOAM (C-MOAM), y total (COT) fueron determinados por el método combustión húmeda a temperatura constante (Schlichting *et al.*, 1995). Se determinó además el contenido de N total en la MOP (N-MOP), en la MOAM (N-MOAM), y total (Nt) por el método de Kjeldahl (Bremner & Mulvaney, 1982). Una vez obtenidos estos datos, se calculó la relación C/N del la MO, la MOP y la MOAM.

Se estimó el potencial de mineralización de N (Nan) incubando una muestra en anaerobiosis durante 7 días a 40°C (Waring & Bremner, 1964) y cuantificando el amonio producido por destilación-titulación (Keeney & Nelson, 1982).

Análisis estadístico

Los datos fueron analizados mediante el software estadístico R (R core team, 2010). Se realizaron análisis de la varianza (ANOVA), para todas las variables estudiadas, separadamente para cada profundidad. Cuando se hallaron diferencias entre sitios, las comparaciones entre medias se realizaron mediante el test de mínima diferencia significativa de Fischer (LSD), a un nivel de significancia del 5%.

Además, se ajustaron modelos de regresión lineal simple, entre el Nan y COT, C-MOP y N-MOP y relación C/N de la MOP como variables explicativas, mediante la función *lm* del software estadístico R.

RESULTADOS

Carbono orgánico total y en fracciones granulométricas

El COT de los sitios analizados presentó valores entre 83,4 y 25,4 g kg⁻¹ suelo y fue afectado significativamente por el sitio a ambas profundidades ($p < 0,05$). El COT de todos los sitios fue superior en los primeros 5 cm del suelo (68,8 g kg⁻¹ suelo, en promedio) con respecto al estrato 5-20 cm (42,4 g kg⁻¹ suelo, en promedio). A ambas profundidades la mayor acumulación de carbono se observó en MP y la menor en AGR ($p < 0,05$). El análisis del C-MOP y C-MOAM también reveló efecto significativo del sitio a ambas profundidades ($p < 0,05$). El mayor contenido de C-MOP en los primeros 5 cm del perfil se cuantificó en PN, seguido de MP, PS y AGR. En la profundidad de 5-20 cm, el mayor C-MOP se halló en PS, seguido de PN, MP y AGR respectivamente ($p < 0,05$) (**Figura 1**). El mayor contenido de C-MOAM en los primeros 5 cm del perfil se presentó en MP y PS (sin diferencias entre los mismos) ($p < 0,05$) (**Figura 1**). Dicha situación determinó

el mayor COT en estos sitios en relación a PN. En AGR en cambio, el menor COT se explicó por un menor contenido de C en ambas fracciones.

Nitrógeno total y en fracciones granulométricas

El contenido de Nt de los sitios analizados presentó valores entre 5,8 y 1,5 g N kg⁻¹ suelo y fue afectado significativamente por el sitio a ambas profundidades ($p < 0,05$). Al igual que el COT, el Nt de todos los sitios fue superior en los primeros 5 cm del suelo (4,7 g kg⁻¹ suelo, en promedio) con respecto al estrato 5-20 cm (2,7 g kg⁻¹ suelo, en promedio). En los primeros 5 cm del perfil, PN presentó mayor Nt, mientras que de 5-20 cm el mayor valor se halló en MP. A ambas profundidades, AGR presentó menores valores de Nt ($p < 0,05$) (**Figura 2**). El análisis del N-MOP y N-MOAM también reveló efecto significativo del sitio, a ambas profundidades ($p < 0,05$). El mayor contenido de N-MOP en los primeros 5 cm del perfil se cuantificó bajo PN, siendo esta fracción la determinante de la diferencia en Nt, entre este sitio y MP y PS ($p < 0,05$) (**Figura 2**). A la profun-

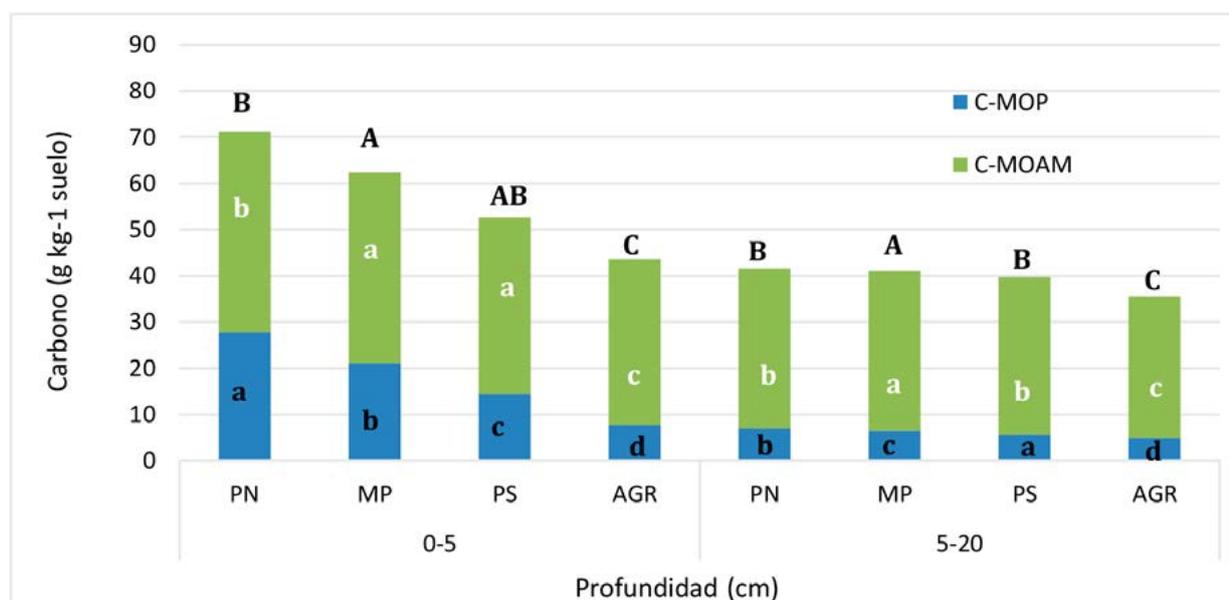


Figura 1: Carbono en las fracciones MOP y MOAM en sitios bajo pastizal natural (PN), monte de pinos (MP), pastizal secundario (PS) y agricultura (AGR) a dos profundidades. La suma de C-MOP y C-MOAM representa el COT.

Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas de COT entre sitios a una misma profundidad. Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas en C-MOP y C-MOAM entre sitios a una misma profundidad (LSD, $\alpha = 0,05$).

Figure 1: Carbon in MOP and MOAM fractions at sites under natural grassland (PN), pine forest (MP), secondary grassland (PS), and agriculture (AGR) at two soil depths. The sum of C-MOP and C-MOAM represents COT.

Different uppercase letters indicate significant differences of COT between sites at the same depth. Significant lowercase letters indicate significant differences in C-MOP and C-MOAM between sites at same depth (LSD, $\alpha = 0,05$).

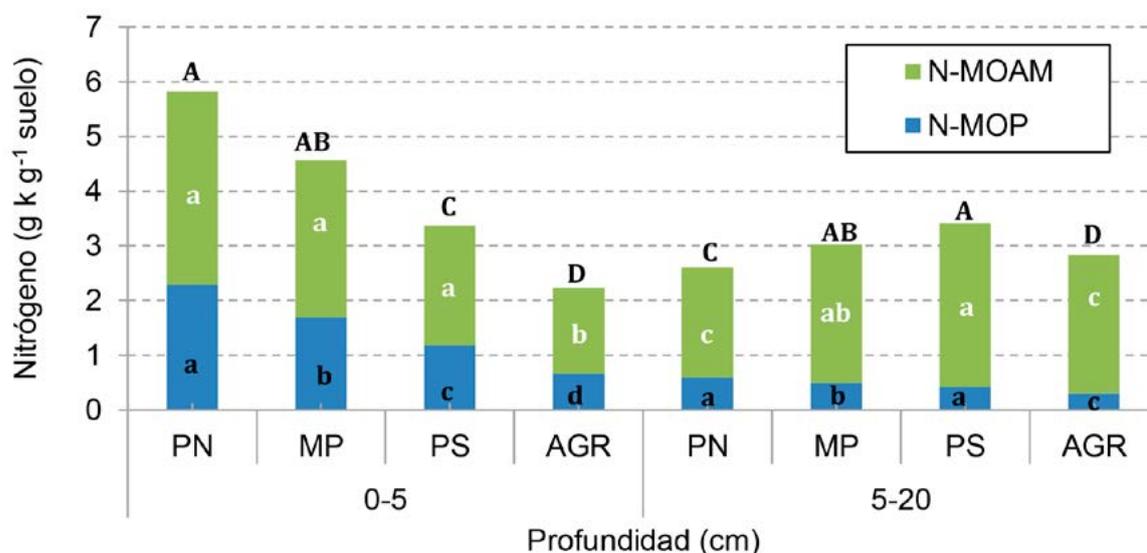


Figura 2: Nitrógeno en las fracciones MOP y MOAM, en sitios bajo pastizal natural (PN), monte de pinos (MP), pastizal secundario (PS) y agricultura (AGR) a dos profundidades. La suma de N-MOP y N-MOAM representa el Nt.

Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas de Nt entre sitios a una misma profundidad. Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas en N-MOP y N-MOAM entre sitios a una misma profundidad (LSD, $\alpha=0,05$).

Figure 2: Nitrogen in MOP and MOAM fractions, at sites on natural grassland (PN), pine forest (MP), secondary grassland (PS) and agriculture (AGR) at two soil depths. The sum of N-MOP and N-MOAM represents Nt.

Different uppercase letters indicate significant differences of Nt between Sites at the same depth. Different lowercase letters indicate significant differences in N-MOP and N-MOAM between sites at the same depth (LSD, $\alpha = 0,05$).

didad de 5-20 cm, los mayores valores de N-MOP fueron los de PN y PS, sin diferencias entre sí, mientras que MP presentó un valor intermedio de N-MOP y AGR el menor valor ($p < 0,05$) (**Figura 2**). El N-MOAM de los primeros 5 cm no presentó diferencias entre PN, MP y PS (3,6 g kg⁻¹ suelo, en promedio), mientras que en AGR el valor fue 0,6 g kg⁻¹ suelo inferior ($p < 0,05$). A la profundidad de 5-20 cm en cambio, el mayor contenido de N-MOAM fue el de PS, seguido de MP, PN y AGR, sin diferencias significativas entre las dos últimas situaciones de manejo (**Figura 2**). El menor Nt hallado en AGR se relacionó con un menor contenido de N en ambas fracciones.

Relación C/N del suelo y de las fracciones granulométricas

La relación C/N de las fracciones analizadas presentó una gran variabilidad entre sitios y profundidades, lo cual resulta lógico en función de la gran diferencia en calidad, cantidad y distribución de los residuos aportados por la vegetación

de cada sistema en el perfil. La relación C/N de la MOAM fue menor y mucho menos variable que la de MOP para todos los sistemas y profundidades estudiadas (**Tabla 2**). En los primeros 5 cm de suelo se encontró en PN el mayor contenido de Nt, y asociado a ello, su relación C/N fue también menor con respecto a MP y PS, los cuales no se diferenciaron entre sí. A esta profundidad la relación C/N de la MOP de PS fue la mayor, casi el doble del resto de las situaciones analizadas ($p < 0,05$) (**Tabla 2**). En cambio, a la profundidad de 5-20 cm, el mayor contenido de Nt fue el de PS, y de la misma manera su relación C/N también fue la más baja entre los sistemas estudiados. La relación C/N de la MOP fue mas variable aún en el estrato inferior, siendo el valor más bajo el hallado en MP y el mas alto en AGR (**Tabla 2**).

Relación entre el Nan y la distribución de C y N en fracciones granulométricas

Los valores de Nan promedio de cada sitio y profundidad se presentan en la **Tabla 3**. El mayor valor de Nan, a ambas profundidades

Tabla 2: Relación C/N del suelo completo y de las fracciones MOAM y MOP de sitios bajo pastizal natural (PN), monte de pinos (MP), pastizal secundario (PS) y agricultura (AGR).

Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre sitios a una misma profundidad (LSD, $\alpha=0,05$).

Table 2: C/N ratio of the whole soil and the MOAM and MOP fractions of sites under natural grassland (PN), pines forest (MP), secondary grassland (PS) and agriculture (AGR).

Different lowercase letters indicate significant differences between sites at the same soil depth (LSD, $\alpha = 0,05$).

Sitio	Profundidad (cm)	Relación C/N					
		Suelo completo		MOA		MOP	
PN	0-5	12,236	c	12,313	b	12,155	c
MP		16,122	b	15,996	a	16,486	b
PS		17,876	a	15,230	a	30,929	a
AGR		11,624	c	11,381	b	13,679	bc
PN	5-20	19,458	a	22,803	a	11,562	c
MP		18,040	b	20,011	b	8,229	d
PS		10,948	d	10,039	d	15,445	b
AGR		16,052	c	14,996	c	30,938	a

se halló en PN, mientras que el menor valor se encontró en AGR. Los sitios MP y PS, presentaron valores intermedios, sin diferencias significativas entre ellos ($p < 0,05$) (**Tabla 3**). Las relaciones entre el Nan y los contenidos de COT, C-MOP y N-MOP y relación C/N de la MOP se presentan en las **Figuras 3.a, 3.b, 3.c y 3.d**, respectivamente.

Tabla 3: Nitrógeno liberado en incubación anaeróbica corta (Nan) de sitios bajo pastizal natural (PN), monte de pinos (MP), pastizal secundario (PS) y agricultura (AGR).

Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre sitios a una misma profundidad (LSD, $\alpha=0,05$).

Table 3: Nitrogen released in short anaerobic incubation (Nan) under natural grassland (PN), pines forest (MP), secondary grassland (PS) and agriculture (AGR).

Different lowercase letters indicate significant differences between sites at the same depth (LSD, $\alpha = 0,05$).

Sitio	Profundidad (cm)	Nan (g kg ⁻¹ suelo)	
PN	0-5	249,55	a
MP		143,17	b
PS		151,50	b
AGR		91,34	c
PN	5-20	116,15	a
MP		103,72	b
PS		103,97	b
AGR		67,74	c

Las tres primeras relaciones mencionadas fueron significativas y la asociación fue mayor cuando se analizó la relación entre Nan y C-MOP, que cuando el análisis fue hecho entre Nan y COT. La asociación mejoró cuando se analizó la relación entre Nan y N-MOP, siendo su coeficiente de determinación (R^2), el mayor de entre las asociaciones estudiadas ($p < 0,05$). No se encontró asociación entre la relación C/N de la MOP y el Nan (**Figura 3.d**).

DISCUSIÓN

Los resultados muestran la influencia directa de la cantidad y calidad del residuo aportado en cada sistema sobre el COT y Nt. Bajo PN se halló un menor COT y mayor Nt en comparación con MP y PS (**Figuras 1 y 2**). Es conocido que los montes aportan mayor cantidad de biomasa en relación a los pastizales (Paruelo et al., 2000), pero con una mayor relación C/N. Esto implica por un lado, menor aporte de nitrógeno en relación a los pastizales, y por otro, que su descomposición es limitada (Schlatter & Otero, 1995). En el caso de PS, a pesar que ya no hay aporte de residuos de pinos, y además las especies herbáceas que crecieron luego del raleo generan residuos de mayor calidad, los valores de C y N

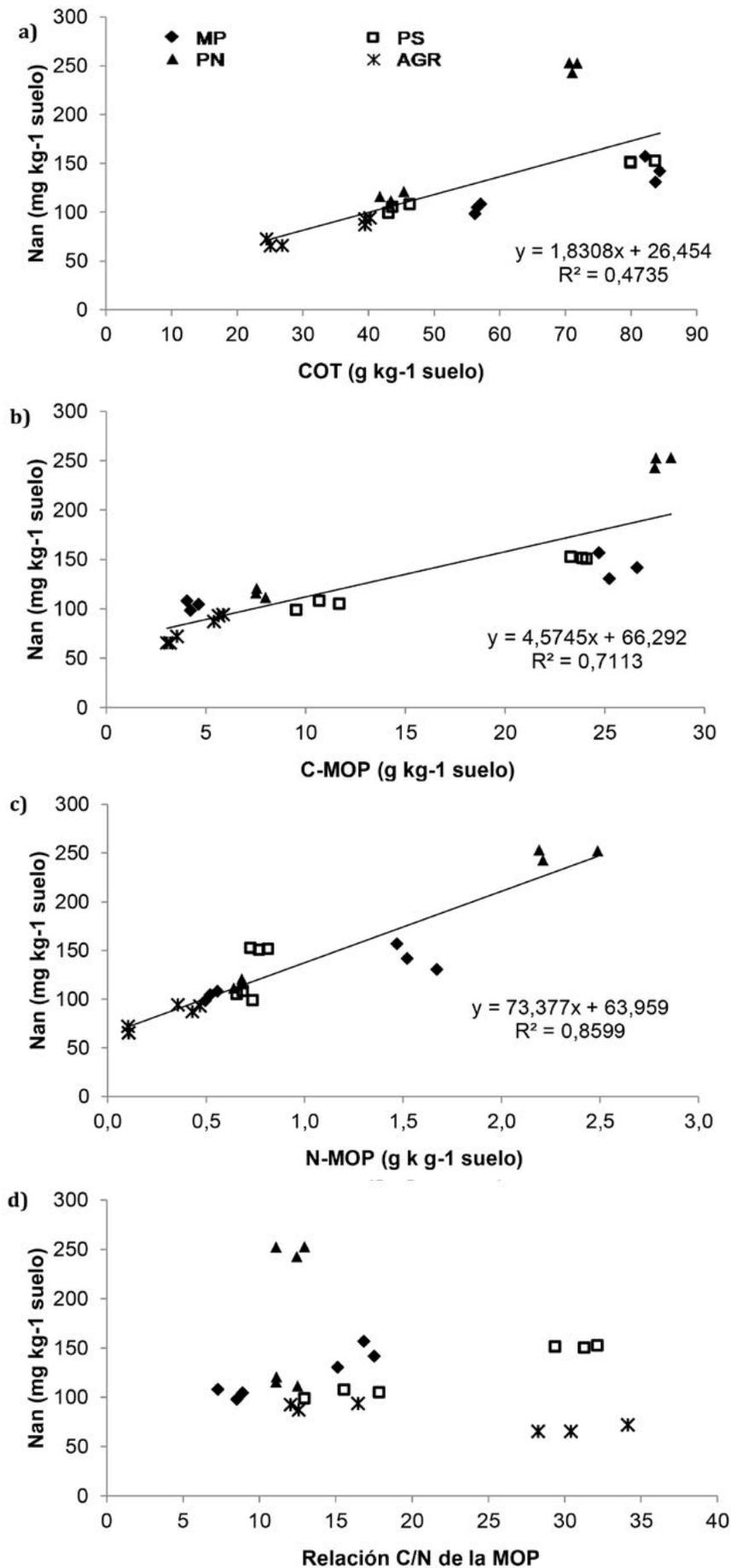


Figura 3: Relación entre nitrógeno incubado en anaerobiosis (Nan) y carbono orgánico total (COT) (a), carbono en la fracción MOP (C-MOP) (b), nitrógeno en la fracción MOP (N-MOP) (c) y relación C/N de la fracción MOP (d).

Figure 3: Relationship between nitrogen incubated in anaerobiosis (Nan) and total organic carbon (COT) (a), carbon in the MOP fraction (C-MOP) (b), nitrogen in the MOP fraction, (N-MOP) (C) and the C / N ratio of the MOP fraction (d).

se corresponden con los de MP. Es posible que el breve período desde la conversión de MP a PS, tres años al momento de realizado el muestreo, sea causante de este resultado.

Al comparar PN con AGR se observa valores marcadamente menores tanto de COT como de Nt (**Figuras 1 y 2**) particularmente en los primeros 5 cm del suelo. A pesar de que existen diferencias en la calidad del aporte entre residuos de cultivos y los pastizales, dicha diferencia no es tan notoria como la existente entre los pastizales y las forestaciones. En la Región Pampeana los aportes de residuos de los cultivos anuales oscilan entre 30 y 70 % de los atribuidos a los pastizales naturales (Alvarez & Steinbach, 2012), conduciendo a la disminución de los niveles de COT y Nt de los suelos cultivados en comparación con los no cultivados. Es preciso tener en cuenta también que al reemplazar pastizales por cultivos, las tareas de labranza del suelo producen un disturbio que genera oxidación de la materia orgánica (Balesdent *et al.*, 2000).

En suelos Argiudoles de la misma región geográfica y características edáficas, Rodríguez *et al.*, (2015), también hallaron mayores valores de COT en sitios forestados con acacias, que en pastizales naturales, con diferencias entre sitios similares a las halladas en este trabajo. Ecclesia *et al.* (2012), en una revisión que incluyó un amplio rango de climas y tipos de suelo, concluyeron que el balance de carbono del suelo en las transiciones de vegetación natural a forestaciones, depende de la precipitación media anual del sitio y de la edad de la plantación. Así, en sitios con precipitación media anual menor a 1200 mm y más de 20 años desde la conversión, lo cual coincide con las características de los sitios analizados en el presente estudio, se presentan ganancias netas de carbono o valores similares al de la vegetación original.

Por otro lado, es conocido que el pH del suelo es el factor dominante que controla la transformación microbiana de MO (Kemmit *et al.*, 2006). En otro estudio realizado en los mismos sitios, se determinó que el pH de MP es de 5,14 y 5,45 a las profundidades 0-5 y 5-20 cm, respectivamente, valores 0,73 y 0,25 unidades inferiores a los del PN a las mismas profundidades (Di Ge-

rónimo, 2018). Por lo tanto, es razonable inferir que el bajo valor de pH en MP haya limitado la actividad biológica, favoreciendo la acumulación de COT con respecto a PN.

Las diferencias en el COT entre PN y MP son un reflejo de la mayor cantidad de C-MOAM y menor C-MOP en MP, en coincidencia con lo hallado por Ecclesia *et al.* (2012). A pesar de no haberse cuantificado el carbono orgánico disuelto (COD), es probable que esta variable haya sido una fuente de carbono importante en MP, particularmente al C-MOAM, ya que debido a la metodología utilizada, la fracción soluble estaría contabilizada en la MOAM. En un estudio que incluyó los resultados de 42 suelos bajo vegetación forestal de regiones templadas de Norteamérica y Europa, Michalzik *et al.* (2001) demostraron que el COD es un componente importante de la materia orgánica en dichos suelos. Entre 10 y 40 g de COD m² año⁻¹ se traslocan desde los horizontes orgánicos a los horizontes minerales, mientras que los flujos se reducen a valores entre 1 y 10 g de COD m² año⁻¹ hacia horizontes más profundos, sugiriendo una fuerte retención de COD en horizontes subsuperficiales. Los valores más altos, tanto de aporte como de retención presentados en dicho estudio, estuvieron en los suelos forestados con coníferas, como el aquí analizado. Además, existe evidencia bibliográfica de que algunos de los compuestos del COD tienen una alta afinidad por la fracción fina del suelo, siendo rápidamente estabilizados (Kalbitz *et al.*, 2005).

Por otro lado, el contenido de Nt de MP no se diferenció del de PN en los primeros 5 cm, y fue mayor a aquél en el estrato inferior, principalmente por un mayor N-MOAM lo cuál resultó sorpresivo, ya que normalmente las mayores diferencias se presentan en los primeros cm del perfil.

La apertura del dosel arbóreo (PS) no ocasionó cambios en el COT en los primeros 5 cm del suelo, pero sí una disminución del C-MOP, del Nt y del N-MOP (**Figuras 1 y 2**). En la profundidad de 5-20 cm, el COT disminuyó luego de la conversión de MP a PS principalmente por una disminución de C-MOAM, y el Nt aumentó, en este caso por un aumento del N en ambas fracciones. El

aumento de pH de 0,2 unidades a ambas profundidades en PS con respecto a MP (Di Gerónimo, 2017), pudo estimular la actividad biológica y con ello la mineralización de C-MOP y N-MOP en los primeros 5 cm del suelo, ya que éstas son las fracciones más lábiles. Sin embargo, de 5-20 cm, el N-MOP de PS fue superior al de MP. Es posible que el mayor contenido de N a esta profundidad se origine en la mayor calidad de las raíces de las especies herbáceas que se desarrollan bajo PS. En presencia de una fuente de carbono fácilmente disponible y condiciones más propicias para la actividad biológica (mayor pH), el residuo de pinos remanente a esta profundidad también pudo ser descompuesto y los compuestos nitrogenados formados, incorporados a la MOP (Cotrufo *et al.*, 2013).

El menor valor de COT en AGR con respecto a PN coincide con lo reportado por Rodríguez *et al.* (2015) para Argiudoles del Sudeste Bonaerense y por Sainz Rozas *et al.* (2011) para la Región Pampeana. La reducción de C de los suelos del Sudeste Bonaerense reportada por Sainz Rozas *et al.* (2011) fue de 36,6% en los primeros 20 cm del suelo con respecto a su situación prístina, lo cual es algo menor que los valores encontrados en este estudio (43,8%, promedio ponderado de 0-20 cm). Los menores valores de COT y Nt en AGR con respecto a PN, se asociaron a menor contenido de C y N en ambas fracciones estudiadas, pero fue más notorio en la MOP, en coincidencia con otros trabajos que afirman que la MOP tiende a disminuir rápidamente cuando un suelo bajo vegetación nativa es utilizado para cultivos agrícolas anuales (Six *et al.*, 1998, Eiza *et al.*, 2005). Dado que la mineralización del C y N edáficos son procesos acoplados, resulta lógico observar que la reducción en el contenido de C-MOP por el uso agrícola, se asocia a una reducción en el contenido de N de dicha fracción (Diovisalvi *et al.*, 2008). La diferencia significativa de C-MOAM y N-MOAM entre PN y AGR es evidencia de un nivel de degradación del suelo importante por su uso agrícola.

A pesar de que se ha reportado una estrecha asociación entre Nan y COT (Urquieta *et al.*, 2008), en este estudio los sitios con mayor COT (MP y PS), no fueron los de mayor Nan (**Tabla 2**

Figuras 1 y 3.a). El Nan en PN fue 102,2 mg kg⁻¹ suelo, superior al promedio de MP y PS en los primeros 5 cm del perfil. En el estrato 5-20 cm esta diferencia se mantuvo aunque con menores valores (**Tabla 2**). A pesar de tener un mayor COT, MP y PS presentaron menores contenidos de Nt, C-MOP y N-MOP, lo cual puede explicar al menos en parte los menores valores de Nan hallados en estos sitios en relación a PN.

Es conocido que la MOP por su mayor labilidad con respecto a la MOAM, es una fuente de nitrógeno rápidamente disponible (Haynes, 2005). Es por ello que la asociación hallada entre Nan y C-MOP es más estrecha que con el COT (**Figura 3.b**), en coincidencia con lo reportado por Fabrizzi *et al.* (2003). La asociación es aún mayor con el N-MOP (**Figura 3.c**), al igual que lo hallado por Diovisalvi *et al.* (2008) y Gregorutti *et al.* (2008). A pesar que las relaciones entre Nan y C-MOP y entre Nan y N-MOP son estrechas y significativas, cuando el mismo análisis se realizó excluyendo los datos de MP, el R² de la primera relación aumentó de 0,71 a 0,84; mientras que el R² entre Nan y N-MOP aumentó de 0,85 a 0,94. Esto es indicio de que en MP existe una fuente de variación no contemplada, que podría estar asociada a la calidad de la MO. Se podría esperar entonces, que las diferencias en Nan se explicaran por cambios en un parámetro de calidad de la MOP, como la relación C/N. A pesar de ello, no se encontró asociación de ningún tipo entre dichas variables (**Figura 3.d**) ($p > 0,05$). En la misma línea también se analizó la proporción de Nt presente en la fracción MOP (relación N-MOP/Nt). Esta relación mostró escasa variabilidad, presentando valores entre 29% (AGR) y 39% (PN) en los primeros 5 cm, y entre el 10% y el 22% en 5-20 cm. Sin embargo esta variable no presentó diferencias significativas entre PN, PS y MP a ninguna profundidad; sólo se halló diferencia entre estos tres sitios y AGR. En base a los resultados presentados, que muestran que el uso del suelo afecta la dinámica de las fracciones de la materia orgánica del suelo, y en consecuencia las funciones edáficas que ella condiciona, como el potencial de mineralización del nitrógeno, se considera necesario profundizar estos estudios, de manera de explicar las diferen-

cias en Nan de sitios con vegetación tan contrastante.

CONCLUSIONES

La materia orgánica refleja los cambios en las características de los residuos en cada situación de manejo. Bajo influencia forestal, hay una gran acumulación de carbono con respecto a aquellos sistemas cuya vegetación es herbácea, mientras que estos últimos acumulan relativamente más nitrógeno con respecto a los primeros. Bajo las condiciones edafoclimáticas analizadas los diferentes usos del suelo, generan cambios en los patrones de distribución de C y N en fracciones granulométricas. En el manejo agrícola, las mayores diferencias con respecto al resto de los sistemas se hallaron en la MOP mientras que en la forestación estuvieron asociadas principalmente a cambios en fracción MOAM. Estos resultados generan la necesidad de profundizar el conocimiento sobre la dinámica del C y N en suelos forestales.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez R & HS Steinbach. 2012. Efecto del uso agrícola sobre el nivel de materia orgánica. En: Álvarez R; G Rubio; CR Álvarez; & RS Lavado (eds). Fertilidad de suelos caracterización y manejo en la Región Pampeana. Facultad de Agronomía-UBA. Buenos Aires. pp 181-199.
- Balesdent J; C Chenu & M Balabane. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil Till. Res.* 53(3):215-230.
- Bremner JM & CS Mulvaney. 1982. Nitrogen-total. In Page Al; RH Miller & DR Keeney (eds.). *Methods Of Soil Analysis. Chemical and Microbiological Methods.* American Society Of Agronomy Madison Wisconsin USA. pp. 595-617.
- Cambardella CA & ET Elliot. 1992. Particle soil organic-matter changes across agrassland cultivation sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 6(3): 777-783.
- Cotrufo MF; MD Wallenstein; CM Boot; K Deneff & E Paul. 2013. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (Mems) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Glob. Change Biol.* 19(4): 988-995.
- Di Gerónimo PF. 2018. Cambios en algunas propiedades químicas del suelo en áreas forestadas, deforestadas y agrícolas *Chilean Journal of Agricultural and Animal Sciences.* En prensa.
- Diovisalvi NV; GA Studdert; GF Domínguez & MJ Eiza. 2008. Fracciones de carbono y nitrógeno orgánicos y nitrógeno anaeróbico bajo agricultura continua con dos sistemas de labranza. *Ci. Suelo.* 26(1): 1-11.
- Dominguez GF; NV Diovisalvi; GA Studdert & MG Monterubianesi. 2009. Soil organic C and N fractions under continuous cropping with contrasting tillage systems on mollisols of the southeastern Pampas. *Soil Till. Res.* 102: 93-100.
- Doran JW & TB Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality In: Doran JW; DC Coleman; DF Bezdicek & BA Stewart (Eds). *Defining soil quality for a sustainable environment.* Soil Sci. Soc. Am. J. Special Publication N° 35. Madison Wisconsin E.E.U.U. pp3-21.
- Echevarría HE; N San Martín & R Bergonzi. 2000. Métodos rápidos de estimación del nitrógeno potencialmente mineralizable en suelos. *Ci. Suelo* 18(1): 9-16.
- Eclesia RP; E Jobbagy; RB Jackson; FB Biganzoli & G Piñeiro. 2012. Shifts in soil organic carbon for plantation and grassland establishment in native forests and grasslands of South America. *Global Chan. Biol.* 18(10): 3237-3251.
- Eiza MJ; N Fioriti; GA Studdert & H Echeverría. 2005. Fracciones de carbono orgánico en la capa arable: efecto de los sistemas de cultivo y de la fertilización nitrogenada. *Ci. Suelo* 23(1):59-68.
- Fabrizzi KP; A Morón & FO García. 2003. Soil carbon and nitrogen organic fractions in degraded vs. no degraded Mollisols in Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67(6): 1831-1841.
- Gregorich EG; MH Beare; UF McKim & JO Skjemstad. 2006. Chemical and biological characteristics of physically uncomplexed organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70(3): 975-985.
- Gregorutti VC; LE Novelli; M Melchiori; R José; MV Ormaechea & OP Caviglia. 2014. Nitrógeno incubado en anaerobiosis y su relación con el nitrógeno orgánico en diferentes fracciones. *Ci. Suelo* 32(1):41-51.
- Guo LB & RM Gifford. 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Chan. Biol.* 8(4): 345-360.
- Haynes RJ. 2005. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: an overview. *Adv. Agr.* 85. 221-268.
- INTA. 2014. <http://Anterior.Inta.Gov.Ar/Suelos/Cartas/> Consulta: 15 octubre 2017
- Kalbitz K; D Schwesig; J Rethemeyer & E Matzner. 2005. Stabilization of dissolved organic matter by sorption to the mineral soil. *Soil Biol. Biochem.* 37: 1319-1331.

- Keeney, DR & DW Nelson. 1982. Nitrogen inorganic forms. p. 643-698. In Page AL, et al. (eds.). *Methods of soil analysis. Part 2. Agron. Monog 9 ASA and SSSA*, Madison, WI.
- Kemmitt SJ; D Wright; KWT Goulding & DL Jones. 2006. pH regulation of carbon and nitrogen dynamics in two agricultural soils. *Soil Biol. Biochem.* 38(5): 898-911.
- Lal R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food Security Science. 304(5667):1623-1627.
- Manuel-Navarrete D; G Gallopín; M Blanco; M Díaz-Zorita; D Ferraro; H Herzer; P Littera; M Murmis; G Podestá; J Rabinovich; E Satorre; F Torres & E Viglizzo. 2009. Multi-causal and integrated assessment of sustainability: the case of agriculturization in the Argentine Pampas. *Environ. Dev. Sustain.* 11(3): 621-638.
- Mazzilli SR; AR Kemanian; OR Ernst; RB Jackson & G Piñeiro. 2014. Priming of soil organic carbon decomposition induced by corn compared to soybean crops. *Soil Biol. Biochem.* 75: 273-281.
- Michalzik B; K Kalbitz; JH Park; S Solinger & E Matzner. 2001. Fluxes and concentrations of dissolved organic carbon and nitrogen—a synthesis for temperate forests. *Biogeochemistry.* 52(2): 173-205.
- Paruelo JM; M Oesterheld; CM Di Bella; M Arzadum; J Lafontaine; M Cahupé & CM Rebella. 2000. Estimation of primary production of subhumid rangelands from remote sensing data. *Applied Vegetation Science.* 3(2): 189-195.
- R Development Core Team. 2010. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing Vienna Austria. (<http://www.R-project.org>).
- Rodríguez S; C Videla; EC Zamuner; LI Picone; NN Pose & NO Maceira. 2015. Cambios en propiedades químicas de un suelo Molisol de la Región Pampeana argentina con diferente historia de manejo. *Chilean Journal of Agricultural and Animal Sciences.* 31: 137-148.
- Sainz Rozas HR; HE Echeverría & HP Angelini. 2011. Niveles de carbono orgánico y pH en suelos agrícolas de las Regiones pampeana y extrapampeana argentina. *Ci. Suelo.* 29(1): 29-37.
- Schlatter JE & L Otero. 1995. Efecto de *Pinus radiata* sobre las características químico- nutritivas del suelo mineral superficial. *Bosque* 16(1): 29-46.
- Schlichting, E; HP Blum; & K Stahr. 1995. *Bodenkundliches Prakticum*, Berlin/Wien. Blockwell. Wissenschafts-Verlag. 295p.
- Sequeira CH; MA Marcus & BP Jones. 2011. Evaluation of potentially labile soil organic carbon and nitrogen fractionation procedures. *Soil Biol. Biochem.* 43(2): 438-444.
- Six J, H Bossuyt; S Degryze & K Denef. 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics *Soil Tillage Res.* 79 7–31
- Six J; RT Conant; EA Paul & K Paustian. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant soil.* 241(2):155-176.
- Six J; ET Elliott; K Paustian & JW Doran. 1998. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62(5): 1367-1377.
- Soil Survey Staff. 2014. *Keys To Soil Taxonomy 12th Ed.* USDA-Natural Resources Conservation Service. Washington Dc.
- Studdert GA & HE Echeverría. 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64(4):1496-1503.
- Tan Z; R Lal L Owens & RC Izaurrealde. 2007. Distribution of light and heavy fractions of soil organic carbon as related to land use and tillage practice. *Soil Till. Res.* 92(1): 53–59.
- Urquieta JF; GF Domínguez; GA Studdert & S Tettenborn. 2008. Relación entre nitrógeno anaeróbico y materia orgánica de suelos del Sudeste Bonaerense. *Actas “XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo”*. 13 a 16 de mayo de 2008 Potrero de los Funes San Luis Argentina. En CD.
- Waring SA & JM Bremner. 1964. Ammonium production in soil under waterlogged condition as an index of nitrogen availability. *Nature* 201: 951-952.
- Whalen JK; PJ Bottomley & DD Myrold. 2000. Carbon and nitrogen mineralization from light and heavy fraction additions to soil. *Soil Biol. Biochem.* 32(10): 134-1352.