

VARIACIÓN ESTACIONAL DE CARBONO ORGÁNICO PARTICULADO Y NITRÓGENO ANAERÓBICO

GUILLERMO ALBERTO STUDDERT^{1*}; GERMÁN FRANCO DOMÍNGUEZ¹; MARÍA CRISTINA ZAGAME²
& JUAN CARLOS CARABACA²

Recibido: 30-08-14

Recibido con revisiones: 13-10-14

Aceptado: 25-10-14

RESUMEN

Las fracciones lábiles de la materia orgánica como el carbono orgánico particulado (COP) y el nitrógeno (N) liberado en incubación anaeróbica (Nan)) son indicadores de salud edáfica. Sin embargo, sus contenidos pueden variar en el tiempo limitando su utilidad como tales. El objetivo del trabajo fue evaluar la variación estacional de COP y Nan bajo diferentes manejos. Se tomaron muestras a 0-5 y 5-20 cm de un complejo de Molisoles en un ensayo de sistemas de labranza (siembra directa (SD) y labranza convencional (LC)) y fertilización nitrogenada (con y sin N) en distintos momentos entre otoño y primavera de dos años (2007 y 2009). Se determinaron los contenidos de CO total (COT), COP y Nan. Se observaron mayores contenidos de COP y Nan a 0-20 cm en 2009 (4,8 g kg⁻¹ y 56,2 mg kg⁻¹, respectivamente) que en 2007 (3,7 g kg⁻¹ y 47,0 mg kg⁻¹, respectivamente) y, en cada año, mayores contenidos bajo SD y con N, aunque no siempre significativamente. En 2009, COT y COP a 0-20 cm no variaron en el tiempo, mientras que en 2007 sí lo hicieron aunque levemente y sin tendencias claras. Sin embargo, el Nan disminuyó entre los muestreos de julio y octubre de cada año, aunque sólo en 2009 significativamente. El Nan a 0-20 cm en julio de 2009 fue 13,5 mg kg⁻¹ mayor que en 2007, mientras que en octubre lo fue en sólo 6,7 mg kg⁻¹. Hubo relaciones inversas entre COP y Nan a 0-20 cm y la respuesta del maíz al agregado de N, diferentes entre SD y LC y para los momentos de muestreo y sólo significativas para Nan. Dada su escasa variación en el tiempo, el COP podría utilizarse como indicador de salud edáfica, mientras que la observada en el Nan haría necesario tener en cuenta el momento de muestreo y/o las condiciones previas.

Palabras clave. Materia orgánica particulada, nitrógeno potencialmente mineralizable, siembra directa, labranza convencional.

SEASONAL VARIATION OF PARTICULATE ORGANIC CARBON AND ANAEROBIC NITROGEN

ABSTRACT

Labile soil organic matter fractions (particulate (COP) organic carbon (CO) and nitrogen (N) released through anaerobic incubation (Nan)) are soil health indicators. However, COP and Nan contents may change in time limiting utility as indicators. The aim of this study was to evaluate seasonal variation of COP and Nan under different managements. Soil samples were taken at 0-5 and 5-20-cm depths at different moments between fall and spring in two years (2007 and 2009) from a complex of Mollisols under contrasting tillage systems (no-tillage (SD) and conventional tillage (LC)) and N fertilization (with and without N). Total CO (COT), COP and Nan contents were determined. In 2009, COP and Nan contents at 0-20 cm (4.8 g kg⁻¹ and 56.2 mg kg⁻¹, respectively) were higher than in 2007 (3.7 g kg⁻¹ and 47.0 mg kg⁻¹, respectively) and, in each year, they were higher under SD and with N, although not always significantly. Besides, in 2009, COT and COP did not change in time, but in 2007 they changed slightly and without clear trends. Nan decreased between July and October sampling times of each year, although significantly only in 2009. In July, Nan at 0-20 cm was 13.5 mg kg⁻¹ higher in 2009 than in 2007, whereas in October the difference was 6.7 mg kg⁻¹. There were inverse relationships between COP and Nan at 0-20 cm and corn response to N, but were significant only for Nan. Such relationships were different between SD and LC and among sampling moments. Given its scarce variation in time, the use of COP as an indicator would be possible regardless of the sampling time. Nan showed more variation in time; the possibility of using Nan as indicator would require more adjustments taking into account the sampling time and/or the previous conditions.

Key words. Particulate organic matter, potentially mineralizable nitrogen, no-tillage, conventional tillage.

¹ Dpt. Prod. Vegetal, Suelos e Ingeniería Rural, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata, Unidad Integrada Balcarce.

² Profesional de la actividad privada.

*Autor de contacto: studdert.guillermo@inta.gob.ar

INTRODUCCIÓN

El contenido de materia orgánica del suelo (MO) y su variación, son componentes insoslayables de los índices de salud edáfica (Doran *et al.*, 1996). Esto es debido a que la MO está íntimamente relacionada con la capacidad del suelo de cumplir con sus funciones en el agroecosistema, tales como almacenar y proveer nutrientes, almacenar agua y permitir su circulación y la del aire, mantener una estructura estable y resistir a la erosión (Weil & Magdoff, 2004). Asimismo, determina la capacidad del suelo de reorganizarse ante las alteraciones provocadas por el uso (Weil & Magdoff, 2004) y se relaciona con la emisión y el secuestro de carbono (Franzluebbers, 2005). Por otro lado, la MO, y especialmente sus fracciones lábiles, son los componentes del suelo más sensibles a las alteraciones producidas por el uso agrícola (Wander, 2004).

Una de las fracciones más lábiles de la MO es la denominada MO particulada (MOP) que es de origen reciente y está constituida por restos vegetales en descomposición y por hifas de hongos, esporas, granos de polen y restos de fauna edáfica (Wander, 2004). Esta fracción tiene una relativamente alta relación C/N y un rápido reciclaje, y puede ser separada fácilmente por tamizado con circulación de agua (Cambardella & Elliott, 1992). Desempeña un importante rol no sólo para la actividad biológica del suelo, sino también para sus propiedades físicas. Interviene en la agrupación de partículas para formar macro- y microagregados y en el proceso de reciclado de los agregados. Dicho proceso determina la estabilidad de los agregados e incide sobre el grado de protección física de la MO en función del manejo del suelo (Six *et al.*, 2004). Roldán *et al.* (2014) han mostrado que la estabilidad de los macroagregados de dos Molisoles bajo distintos sistemas de labranza y diferentes formas de uso se relacionó estrechamente con el contenido de MOP en ellos. Por otro lado, el rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays* L) y su respuesta al agregado de nitrógeno (N) (Domínguez *et al.*, 2006a) se relacionó con el contenido de carbono (C) orgánico en la MOP (COP).

La MO, en general, y sus fracciones lábiles, en particular, tienen una importante participación en la dinámica del N edáfico (Fabrizzi *et al.*, 2003; Gregorich *et al.*, 2006; Diovslavi *et al.*, 2008) y en la disponibilidad de ese nutriente para los cultivos (Álvarez & Álvarez, 2000; Wander, 2004). El N potencialmente mineralizable estimado a través del N de amonio ($N-NH_4^+$) mineralizado en anaerobiosis (N anaeróbico, Nan) se ha relacionado positiva y significativamente con el contenido de COP (Studdert *et al.*, 2006)

y con el rendimiento del maíz (Domínguez *et al.*, 2006b). El diagnóstico de la necesidad de fertilizante nitrogenado para maíz (Sainz Rozas *et al.*, 2008) y para trigo (*Triticum aestivum* L.) (Reussi Calvo *et al.*, 2013), ha sido mejorado teniendo en cuenta el contenido de Nan en el suelo ya que es indicador de la capacidad del suelo de mineralizar N durante el ciclo de los cultivos.

Dadas sus características, tanto el COP como el Nan han sido propuestos como indicadores tempranos de la salud del suelo (Fabrizzi *et al.*, 2003; Domínguez *et al.*, 2009; Studdert, 2014). Ambos parámetros edáficos son sensibles a los cambios producidos en el suelo por las prácticas de manejo y no requieren cuidados especiales para la toma y procesamiento de las muestras. Además, son de determinación relativamente sencilla y económica, sus resultados son de fácil interpretación, y su magnitud y dinámica se relacionan con distintas funciones edáficas. Todas estas propiedades son las que debe reunir un parámetro de suelo para poder ser utilizado como indicador de salud edáfica (Doran & Parkin, 1996). Sin embargo, la naturaleza altamente dinámica tanto del COP como del Nan, podría relacionarse con cambios estacionales en su magnitud por variaciones en la disponibilidad de sustrato que generen cambios en la actividad microbiana edáfica (Bonde & Rosswall, 1987; Corre *et al.*, 2002). Bonde y Rosswall (1987) informaron disminuciones en el N potencialmente mineralizable (el cual puede ser estimado por el Nan (Echeverría *et al.*, 2000)) en primavera y verano con sucesivos incrementos en el otoño. Los cambios estacionales podrían estar también relacionados con la calidad del sustrato y con los factores abióticos que regulan su descomposición (Wander, 2004) y la dinámica de la fracción activa de la MO (Bonde & Rosswall, 1987). Las condiciones ambientales, particularmente el contenido de agua y la temperatura del suelo, ejercen una fuerte influencia sobre el proceso de transformación de los materiales vegetales dentro del suelo (Gregorich *et al.*, 2006). Por ello, también podrían esperarse cambios estacionales en las fracciones más lábiles de la MO y de los materiales carbonados que se incorporen según el momento en que se lo haga. Asimismo, la magnitud de tales cambios podría depender, además, de prácticas de manejo que incidan sobre factores que determinan la dinámica del proceso de descomposición del material (*i.e.* temperatura, agua, cantidad y forma física del sustrato, contacto material-suelo) (Gregorich *et al.*, 2006; Casado-Murillo & Abril, 2013) y la de las fracciones lábiles (Six *et al.*, 2004).

De existir tales variaciones en el tiempo, el uso de COP y Nan como indicadores de salud del suelo y/o como contribución al diagnóstico de la fertilidad nitrogenada, dependería del momento del año en que se realizara la determinación. En el Sudeste Bonaerense (SEB), los muestreos de suelo para evaluación y seguimiento de los cambios en la salud del suelo y para el diagnóstico de necesidades de fertilización nitrogenada se realizan entre otoño y primavera y no se ha evaluado si los contenidos de fracciones lábiles de la MO sufren alguna variación durante ese período. A efectos de aportar información que contribuya a ajustar la utilización del COP y del Nan como indicadores de salud edáfica, el objetivo de este trabajo fue evaluar la variación estacional de COP y Nan en un Molisol del SEB bajo dos sistemas de labranza contrastantes, con dos dosis de fertilización nitrogenada y en dos años diferentes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el trabajo se tomaron muestras de suelo en un ensayo de sistemas de labranza iniciado en 1997 en la Unidad Integrada Balcarce (UIB, 37°45'09" S; 58°18'48" W; 138msnm) sobre un complejo de Argiudol Típico (serie Mar del Plata) y Paleudol Petrocálcico (serie Balcarce, horizonte petrocálcico a no menos de 0,70 m) (INTA, 1979) con menos de 2% de pendiente y textura superficial franca. El sitio en el que se llevó a cabo el ensayo había permanecido bajo pastura entre 1992 y 1996, año en que se realizó un cultivo de girasol (*Helianthus annuus* L) bajo labranza reducida (herramientas de disco). A partir de 1997 se aplicaron los sistemas de labranza analizados en este trabajo, aunque ese año se sembró maíz en todo el ensayo. A partir de 1998 se aplicó la secuencia de cultivos maíz-girasol-trigo en tres sectores del ensayo, asignando cada uno de esos cultivos a cada sector como inicio de la secuencia. En este trabajo se analizaron sólo dos de los sectores, uno en el año 2007 (Sector B, diez años de agricultura previa) y el otro en 2009 (Sector C, doce años de agricultura previa). En ambos

sectores, el cultivo anterior al momento de iniciarse los muestreos había sido trigo (cosechado a principios de enero de los años bajo estudio (2007 y 2009)) y en octubre de cada año se sembró maíz.

El diseño experimental de cada sector del ensayo es en bloques completos aleatorizados con arreglo de tratamientos en parcelas divididas y tres repeticiones. A las parcelas principales se asignó el factor sistema de labranza (SL) (niveles LC y SD) y a las sub-parcelas, el factor "fertilización nitrogenada" (FN, niveles con y sin N). En el tratamiento con N, se procuró que el nutriente no fuera limitante, por lo que se aplicaron 90 kg N ha⁻¹ al girasol, 120 kg N ha⁻¹ al trigo, y 180 kg N ha⁻¹ hasta 2004 y 120 kg N ha⁻¹ a partir de 2005, al maíz. Dichas aplicaciones se realizaron todos los años en las mismas sub-parcelas. Las unidades experimentales tienen 5 m de ancho x 40 m de largo (200,0 m²). La LC se realizó con arado de rejas, rastra de discos y rastra de dientes o cultivador de campo para la terminación de la cama de siembra. El número de pasadas con las herramientas fue el mínimo indispensable para lograr una cama de siembra adecuada.

Se tomaron muestras compuestas de suelo de cada unidad experimental en distintos momentos entre la cosecha del trigo y el estadio V6 del maíz (Ritchie & Hanway, 1982) (Tabla 1). Se utilizó un muestreador cilíndrico de 4,5 cm de diámetro para extraer 5 sub-muestras a las profundidades de 0-5 cm y 5-20 cm. Para la comparación entre tratamientos se consideró, además, la profundidad de 0-20 cm, a través del promedio ponderado o la suma, según correspondiera, de los resultados obtenidos para las capas muestreadas de cada una de las variables analizadas. Los momentos de muestreo fueron cinco en 2007 (Sector B) y tres en 2009 (Sector C) (Tabla 1). A cada muestra se le determinó la densidad aparente (DA) según lo descrito por Agostini *et al.* (2014). Luego el suelo fue homogeneizado, secado a 30 °C, y molido hasta pasar por tamiz de 2 mm.

A una alícuota de cada muestra se le determinó el contenido de CO total (COT) y a otra se la sometió a fraccionamiento físico por tamaño de partícula según Cambardella y Elliott (1992), recuperándose la fracción < 50 µm en la que se determi-

Tabla 1. Fechas de muestreo de suelo en cada uno de los sectores experimentales.

Table 1. Soil sampling dates at each experimental site.

Sector del Ensayo (Año)	Identificación del momento de muestreo				
	Otoño-invierno	Pre-siembra maíz	Siembra maíz	Estadio V6 maíz*	
	Número de muestreo				
	1	2	3	4	5
Sector B (2007)	23/05	17/07	04/09	16/10	11/12
Sector C (2009)	-	29/07	-	08/10	02/12

* Ritchie & Hanway, 1982

nó el CO asociado a la fracción mineral (COA). El COT (g kg^{-1}) y el COA (g kg^{-1}) se determinaron por combustión húmeda con mantenimiento de la temperatura de reacción ($120\text{ }^{\circ}\text{C}$) durante 90 minutos (Schlichting *et al.*, 1995). El COP (g kg^{-1}) se determinó por diferencia entre los contenidos de COT y de COA (Cambardella & Elliott, 1992). Los contenidos de COT, COA y COP se expresaron también como masa de C (Mg ha^{-1}) en relación a la masa equivalente de suelo calculada con la máxima DA observada en cada profundidad analizada. A cada muestra se le determinó también el Nan (mg kg^{-1}) mediante incubación anaeróbica a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 7 días según la técnica descrita por Keeney (1982) y Echeverría *et al.* (2000) y las determinaciones de N-NH_4^+ se realizaron por destilación por arrastre con vapor (Keeney & Nelson, 1982).

Se calculó el aporte de residuos del cultivo antecesor inmediato a la toma de las muestras (trigo) a partir de la información registrada de acumulación de materia seca (MS) aérea del mismo. Con ella se estimó el aporte de MS de raíces + rizo-deposición a la profundidad de muestreo según lo descrito por Domínguez y Studdert (2006). Para ello se utilizaron la proporción raíz:parte aérea informada por Buyanovsky y Wagner (1997) y la distribución de raíces en el perfil informada por Buyanovsky y Wagner (1986). En todos los casos se consideró una concentración de C en el material vegetal de 43% (Sánchez *et al.*, 1996). El maíz se cosechó manualmente recogiendo todas las espigas de 10 m^2 (2 tramos de $7,15\text{ m}$ lineales de surcos separados a $0,70\text{ m}$) de cada unidad experimental. Las mismas fueron trilladas con trilladora estática,

se determinó el contenido de humedad de los granos y el rendimiento fue expresado a 14,5% de humedad.

Para cada sector del ensayo (Sector B (2007) y Sector C (2009)) se realizaron análisis de varianza de los resultados con un modelo lineal mixto (Litell *et al.*, 2006), utilizando el procedimiento PROC MIXED del Statistical Analysis System (SAS, 2004), siendo SL, FN y momento de muestreo efectos fijos, y bloque, efecto aleatorio. Los momentos de muestreo fueron considerados como mediciones repetidas en el tiempo y para su análisis se utilizó una estructura de covarianzas autorregresiva (SAS, 2004). Para la comparación de medias en los casos en los que correspondiera, se utilizó el test de diferencia mínima significativa. Se realizaron análisis de regresión lineal simple mediante PROC REG del SAS (SAS, 2004) para determinar relaciones entre las variables medidas y de éstas con el aporte de C por parte del cultivo antecesor y con los rendimientos y respuesta a N del maíz. En todos los análisis estadísticos, para el rechazo de las hipótesis nulas se consideró un valor de $P < 0,05$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La DA fue levemente superior en el Sector B (2007) respecto al C (2009) (en promedio, entre $0,02$ y $0,04\text{ Mg m}^{-3}$ mayor) (Fig. 1). No hubo efecto significativo de las interacciones entre los factores de tratamiento (SL, FN, momento de muestreo) sobre la DA de las unidades experimentales a ninguna de las profundidades ni en ninguno

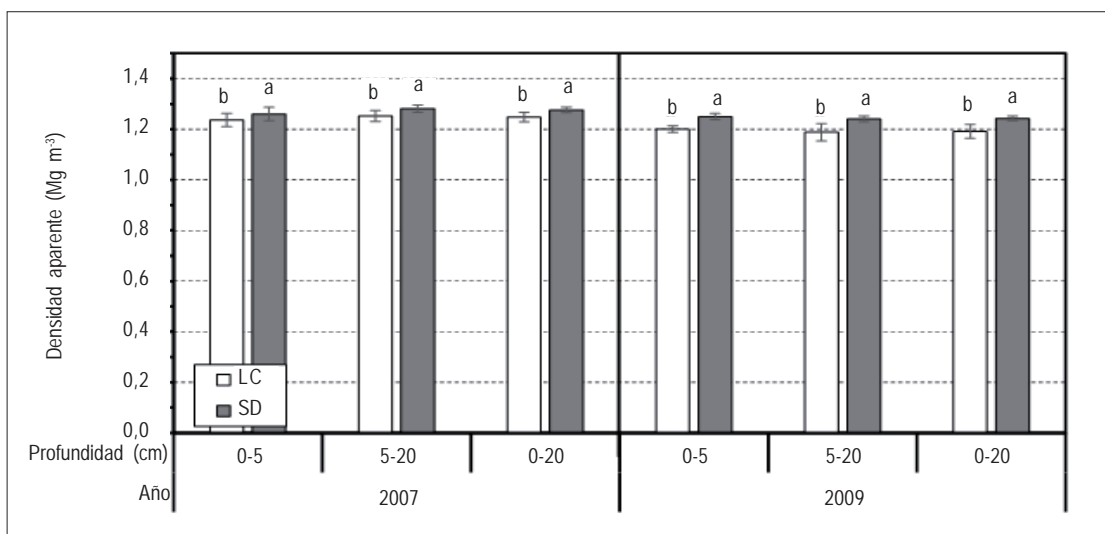


Figura 1. Densidad aparente bajo dos sistemas de labranza (labranza convencional (LC) y siembra directa (SD)) a tres profundidades y en dos años. Letras distintas que acompañan a las columnas dentro de cada profundidad y para cada año indican diferencias significativas ($P < 0,05$) entre sistemas de labranza. Las barras verticales en cada columna indican desvío estándar.

Figure 1. Bulk density under two tillage systems (conventional tillage (LC) and no-tillage (SD)) at three depths and in two years. Different letters above columns within each depth and for each year indicate significant differences ($P < 0.05$). Vertical bars in each column indicate standard deviation.

de los años. No hubo diferencias significativas entre niveles de FN, con excepción de a 5-20 cm en 2007 (1,27 y 1,26 Mg m^{-3} con y sin N, respectivamente). Sí hubo diferencias significativas entre SL en ambas campañas y a las tres profundidades, siendo superior bajo SD (Fig. 1). No obstante, en promedio, las diferencias entre SL oscilaron entre 0,02 y 0,03 Mg m^{-3} en 2007 y fueron de 0,05 Mg m^{-3} en 2009, a favor de SD. Estos resultados coinciden con los informados por Agostini *et al.* (2010a, b) para suelos similares a los analizados en este trabajo y bajo distintos sistemas de cultivo incluyendo LC y SD, aunque con diferencias que no llegaron a ser significativas. Por otro lado, sólo hubo diferencias significativas entre momentos de muestreo en la DA de 0-5 cm en la campaña 2007 con una tendencia declinante (1,26, 1,26, 1,25, 1,24 y 1,23 Mg m^{-3} desde el primer muestreo hasta el último (Tabla 1), respectivamente).

Debido a la escasa diferencia en DA entre los niveles de los factores de tratamiento, el patrón de los resultados de los análisis de varianza de COT, COA y COP expresados en concentración y en masa en relación con la masa equi-

valente de suelo, fueron exactamente iguales (datos no mostrados). Esto indica que las diferencias observadas son debidas a diferencias en concentración y que éstas no fueron afectadas por las pequeñas diferencias en DA. Por lo tanto, se analizarán los resultados de COT, COA y COP expresados en concentración.

No hubo efecto de las interacciones entre factores de tratamiento sobre los contenidos de COT, COA y COP con excepción de la interacción entre SL y FN a la profundidad de 0-5 cm y en ambos años (Fig. 2). Los contenidos de COT y de COP en la capa más superficial fueron significativamente mayores bajo SD y, bajo este SL, en la situación con N (Fig. 2). Estos resultados son coincidentes con lo informado por otros autores para igual suelo (Diovisalvi *et al.*, 2008; Domínguez *et al.*, 2009) y se atribuye al aporte superficial de C de los residuos de cosecha bajo SD (Six *et al.*, 2004). En el año 2007 no hubo efecto de los SL ni de la FN sobre los contenidos de COA, COT y COP a las profundidades de 5-20 cm y de 0-20 cm (datos no mostrados). Sólo el contenido de COP de 5-20 cm fue significativamen-

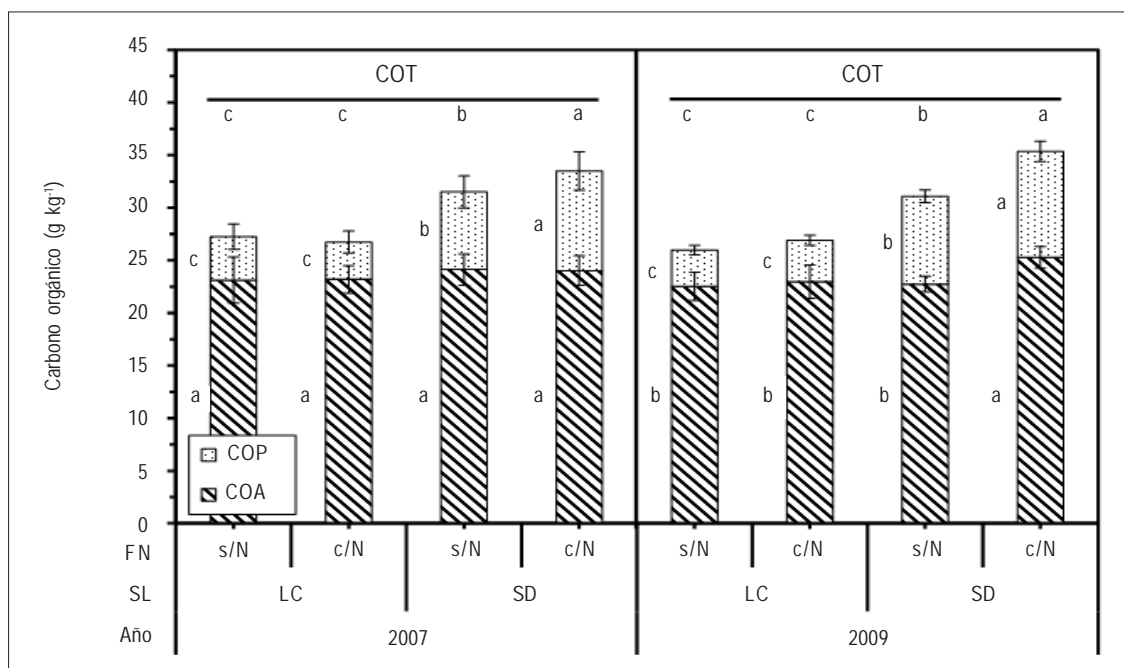


Figura 2. Contenido de carbono orgánico asociado a la fracción mineral (COA), particulado (COP) y total (COT, suma de COA+COP) a 0-5 cm de profundidad bajo dos sistemas de labranza (SL) con dos dosis de fertilización nitrogenada (FN) en dos años. Letras distintas dentro de cada año y para cada fracción de carbono orgánico indican diferencias significativas ($P < 0,05$) entre SL*FN. Las barras verticales en cada columna indican desv estándar. s/N: sin nitrógeno, c/N: con nitrógeno, LC: labranza convencional, SD: siembra directa.

Figure 2. Mineral associated (COA), particulate (COP), and total soil organic carbon (COT, summation of COA+COP) contents at the 0-5 cm depth under two tillage systems (SL) and with two nitrogen fertilization rates (FN) in two years. Different letters within each year and for each soil organic carbon fraction indicate significant differences ($P < 0.05$) among SL*FN. Vertical bars in each column indicate standard deviation. s/N: without nitrogen, c/N: with nitrogen, LC: conventional tillage, SD: no-tillage.

te mayor bajo LC ($3,4 \text{ g kg}^{-1}$) que bajo SD ($2,5 \text{ g kg}^{-1}$). Por otro lado, en 2009, los contenidos de COT y COP a las profundidades de 5-20 cm ($28,1$ y $4,6 \text{ g kg}^{-1}$) y de 0-20 cm ($28,9$ y $5,2 \text{ g kg}^{-1}$) con N fueron significativamente mayores que sin N ($26,7$ y $3,8$, y $27,1$ y $4,3 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente). Asimismo, los contenidos de COT y de COP de 0-20 cm fueron significativamente mayores bajo SD que bajo LC ($28,9$ vs $27,1$ y $5,4$ vs $3,4 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente). Es de destacar que los contenidos de COP fueron mayores en 2009 que en 2007 a las tres profundidades ($4,8$ y $3,5 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente, en promedio para 0-20 cm).

Por otro lado, no hubo efecto de las interacciones entre factores de tratamiento sobre el Nan a ninguna de las profundidades. Tanto el SL como la FN afectaron significativamente el Nan a 0-5 cm (Tabla 2), siendo mayor bajo SD y con N. Asimismo, el Nan a 0-20 cm también fue significativamente mayor bajo SD en ambos años (Tabla 2) mientras que, respecto a FN, si bien los contenidos tendieron a ser mayores con N, lo fueron significativamente sólo en 2009 (Tabla 2). Al igual que COP, el Nan fue más elevado en 2009 que en 2007 ($56,2$ y $47,0 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente, en promedio para 0-20 cm).

En la Figura 3 se presenta la evolución de los contenidos de COT, COA y COP a lo largo de los momentos de muestreo para ambos años promediando a través de SL y de FN. En 2009 no hubo diferencias entre momentos de muestreo en los contenidos de las tres fracciones a ninguna de las profundidades (Figs 3b, d, f). En cambio, en 2007, sí hubo diferencias significativas entre muestreos aunque sin tendencias claras de incremento o disminución (Fig. 4a, c, e). Sin embargo, el Nan mostró diferencias entre momentos de muestreo en ambos años a las tres profundidades (datos no mostrados para 0-5 cm y 5-20 cm y Figura 4 para 0-20 cm). En la Figura 4 se ve que entre los muestreos de julio (Tabla 1) y los correspondientes al momento de la siembra del maíz (Tabla 1) de cada año, hubo una tendencia a la disminución del Nan que fue significativa sólo en 2009 (Fig. 4). No obstante, la diferencia entre años a la siembra del maíz fue mucho menor ($6,7 \text{ mg kg}^{-1}$) y siguió disminuyendo hacia el muestreo en el estadio V6 del cultivo ($1,7 \text{ mg kg}^{-1}$) (Fig. 4).

No hubo diferencias de importancia entre años en el aporte de C estimado por el cultivo de trigo previo a los muestreos (en promedio general, $3,46$ y $3,29 \text{ Mg C ha}^{-1}$

Tabla 2. Nitrógeno anaeróbico bajo dos sistemas de labranza y con dos dosis de fertilización nitrogenada para tres profundidades y en ambos años. Los valores entre paréntesis indican desvío estándar. Letras diferentes acompañando a los valores indican diferencias significativas ($P < 0,05$) entre niveles de sistemas de labranza o de fertilización nitrogenada para cada profundidad y cada año. LC: labranza convencional, SD: siembra directa, s/N: sin nitrógeno, c/N: con nitrógeno.

Table 2. Anaerobic nitrogen under two tillage systems with two nitrogen fertilization rates at three depths and in two years. Values between brackets indicate standard deviation. Different letters next to values indicate significant differences ($P < 0,05$) between tillage system levels or between nitrogen fertilization levels for each depth and each year. LC: conventional tillage, SD: no-tillage, s/N: without nitrogen, c/N: with nitrogen.

Año	Profundidad cm ⁻¹	Sistema de Labranza		Fertilización nitrogenada	
		LC	SD	s/N	c/N
----- mg kg ⁻¹ -----					
2007	0-5	40,9 b (4,4)	91,3 a (5,1)	61,2 b (25,5)	67,0 a (27,5)
	5-20	40,2 a (7,7)	40,5 a (10,2)	41,1 a (8,2)	41,0 a (9,7)
	0-20	40,4 b (6,1)	53,2 a (5,8)	46,1 a (8,4)	47,5 a (11,1)
2009	0-5	53,0 b (5,8)	91,4 a (6,3)	70,5 b (20,6)	73,8 a (20,6)
	5-20	49,8 a (5,1)	52,0 a (5,2)	49,8 a (6,1)	52,0 a (4,0)
	0-20	50,6 b (4,9)	61,9 a (4,9)	55,0 b (8,0)	57,5 a (6,9)

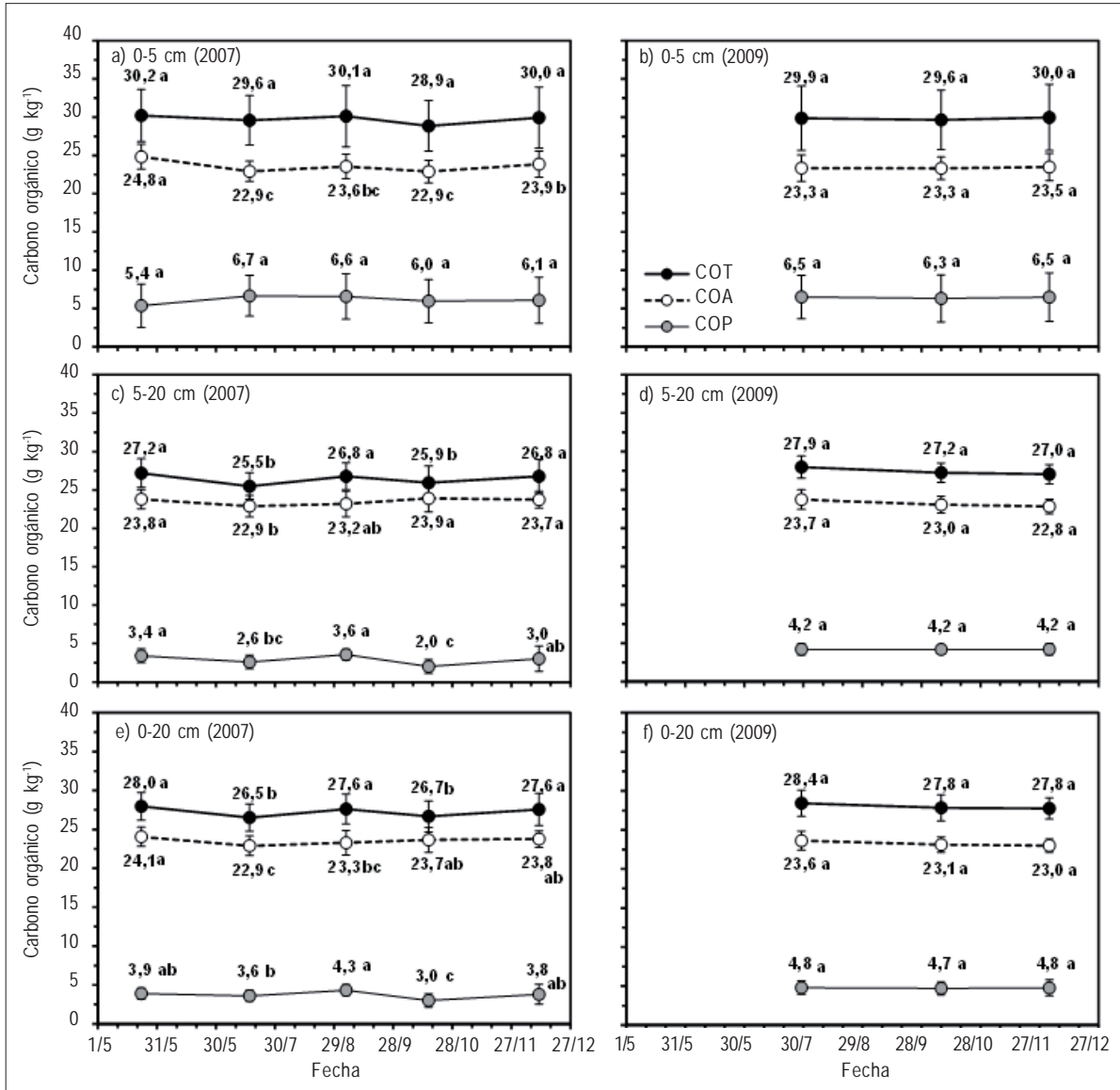


Figura 3. Contenido de carbono orgánico asociado a la fracción mineral (COA), particulado (COP) y total (COT) a 0-5 cm, 5-20 cm y 0-20 cm de profundidad a través de diferentes momentos de muestreo en dos años. Letras distintas para cada fracción de carbono orgánico indican diferencias significativas ($P < 0,05$) entre momentos de muestreo. Las barras verticales indican desvío estándar.

Figure 3. Mineral associated (COA), particulate (COP), and total soil organic carbon (COT) contents at 0-5 cm, 5-20 cm and 0-20 cm depths for different sampling times in two years. Different letters for each soil organic carbon fraction indicate significant differences ($P < 0.05$) among sampling times. Vertical bars indicate standard deviation.

para 2007 y 2009, respectivamente). En ambos años, el aporte fue mayor bajo LC y/o con N (Tabla 3), siendo la interacción entre SL y FN significativa sólo en 2009. Por otro lado, en 2007 (Tabla 3), la aplicación de N provocó un incremento significativo del aporte de C pero el SL no lo afectó diferencialmente. No obstante, sólo en 2009 hubo una relación significativa entre Nan y COP determinados

en el muestreo de invierno, y el aporte de C por el trigo (Nan = 107,2 – 0,01 aporte C, $R^2 = 0,84$; COP = 97,3 – 0,02 aporte C, $R^2 = 0,71$). La magnitud del ingreso de C al suelo no siempre provoca diferencias en los contenidos de MO en el corto o mediano plazo (Casado-Murillo & Abril, 2013) ni de sus fracciones lábiles (Gregorich *et al.*, 2006). Esto sugiere que otros factores que inciden sobre la descompo-

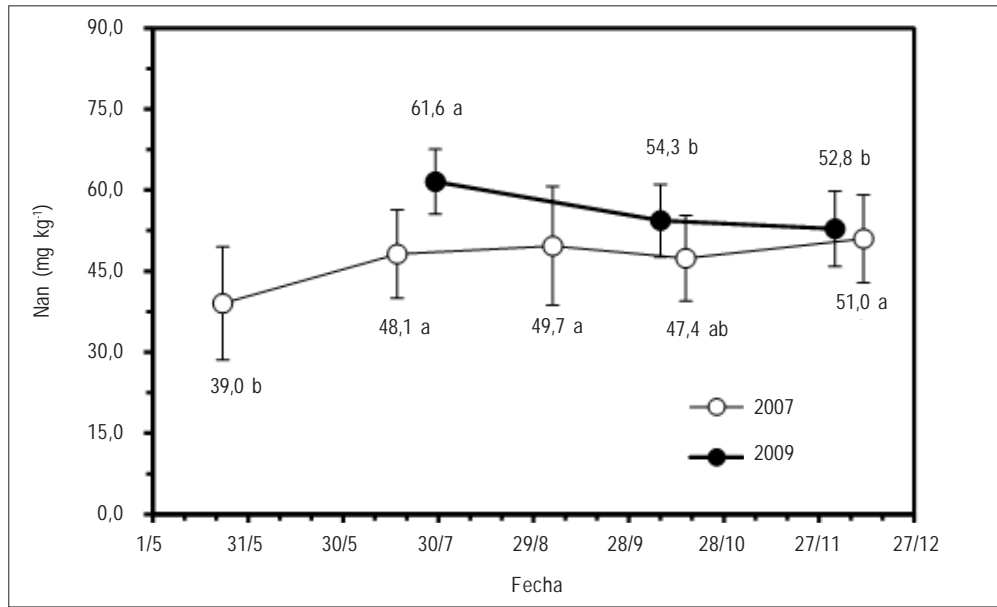


Figura 4. Nitrógeno de amonio liberado durante incubación anaeróbica (Nan) a 0-20 cm de profundidad a través de diferentes momentos de muestreo en dos años. Letras distintas para cada profundidad indican diferencias significativas ($P < 0,05$) entre momentos de muestreo. Las barras verticales indican desvío estándar.

Figure 4. Ammonium nitrogen produced during anaerobic incubation (Nan) at 0-20 cm depth at different sampling times in two years. Different letters for each soil depth indicate significant differences ($P < 0.05$) among sampling times. Vertical bars indicate standard deviation.

Tabla 3. Aporte de carbono (residuos aéreos + raíces y rizodeposición hasta 20 cm de profundidad) del cultivo de trigo previo bajo dos sistemas de labranza y con dos dosis de fertilización nitrogenada en dos años. Los valores entre paréntesis indican desvío estándar. Letras diferentes acompañando a los valores indican diferencias significativas ($P < 0,05$) dentro de cada año. LC: labranza convencional, SD: siembra directa.

Table 3. Carbon input (aboveground residues + roots and rhizodeposition up to 20 cm depth) by the previous wheat under two different tillage systems and two nitrogen fertilization rates in two years. Values between brackets indicate standard deviation. Different letters next to values indicate significant differences ($P < 0.05$) within each year. LC: conventional tillage, SD: no-tillage.

Año	Fertilización nitrogenada	Aporte de carbono trigo		
		Sistema de labranza		
		LC	SD	Promedio
----- Mg ha ⁻¹ -----				
2007	Sin N	3,07 (0,23)	2,76 (0,17)	2,92 b (0,23)
	Con N	3,84 (0,36)	4,19 (0,13)	4,01 a (0,31)
	Promedio	3,45 a (0,50)	3,48 a (0,78)	-
2009	Sin N	3,17 b (0,34)	2,56 c (0,16)	-
	Con N	3,61 a (0,22)	3,81 a (0,21)	-

sición de los residuos (Gregorich *et al.*, 2006) son los que pueden haber provocado las diferencias entre años tanto en COP como en Nan.

En la Figura 5 se presenta información meteorológica de los dos años estudiados en relación con la información histórica. Tanto en 2007 como en 2009, las temperaturas durante los primeros meses de la descomposición del residuo del trigo previo fueron levemente superiores a las históricas (Fig. 5c). Sin embargo, en los meses de enero a abril de 2007 las precipitaciones fueron mayores que en 2009 (Fig. 5a) e hizo que o bien hubiera un menor déficit hídrico o bien que hubiera exceso de agua (Fig. 5b). El déficit de agua entre enero y abril de 2009 (Fig. 5b) seguramente redujo la tasa de descomposición de los residuos de trigo

en 2009 (Gregorich *et al.*, 2006) y cuando el déficit hídrico desapareció (mayo a julio, Figura 5b), la temperatura (Fig. 5c) puede haber sido el factor que limitara la tasa de descomposición (Gregorich *et al.*, 2006; Casado-Murillo & Abril, 2013). Esto afectó la dinámica del proceso descomposición y posiblemente hizo que la determinación de COP y de Nan reflejara mayores concentraciones pero a partir de material que aún no había alcanzado el estado de descomposición final. El paso del tiempo desde julio en adelante permitió que el proceso de descomposición de los residuos en 2009 continuara, acercando los contenidos de Nan a los niveles de 2007 (Fig. 4), aunque no se observó la misma tendencia en COP (Fig. 3). Si bien, tal como informaron otros autores (Fabrizzi *et al.*, 2003; Studdert

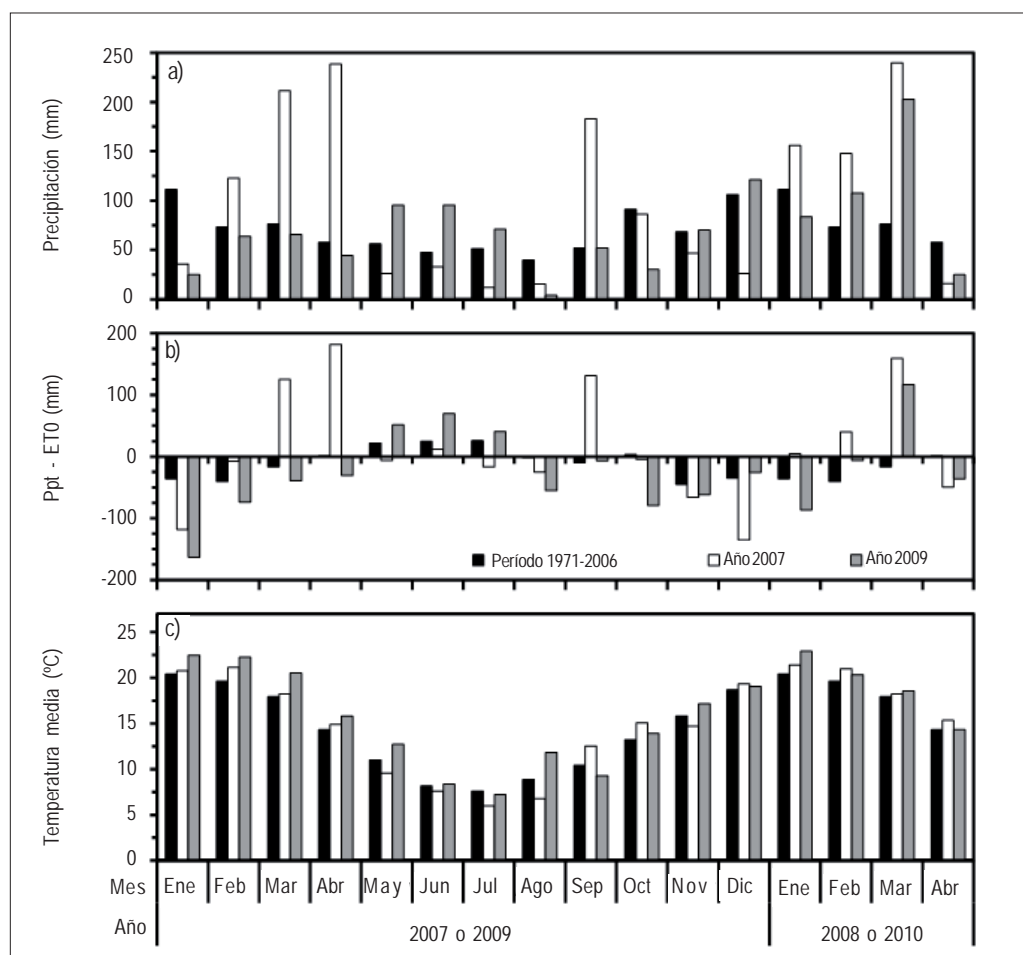


Figura 5. Precipitación mensual (a), diferencia de la precipitación mensual menos la evapotranspiración de referencia mensual (Ppt – ET0, b) y promedio mensual de la temperatura media diaria (c) de enero de 2007 a abril de 2008 (Año 2007), enero de 2009 a abril de 2010 (Año 2009) e histórica (Período 1971-2006) (Fuente: Estación Agrometeorológica Unidad Integrada Balcarce).

Figure 5. Monthly rainfall (a), difference between monthly rainfall and monthly potential evapotranspiration (Ppt – ET0, b) and monthly average of daily mean temperature (c) from January 2007 through April 2008 (Año 2007), January 2009 through April 2010 (Año 2009), and historical (Período 1971-2006) (Source: Estación Agrometeorológica Unidad Integrada Balcarce).

et al., 2006), hubo relación significativa entre Nan y COP a 0-20 cm, el coeficiente de determinación fue bajo ($R^2 = 0,30$) posiblemente debido a las diferentes dinámicas observadas (Figs. 3e, f y 4). La evolución diferencial de COP y Nan dependiendo de las condiciones ambientales, sugiere que la utilización de estas variables como indicadores de salud de suelo o como complemento del diagnóstico de la fertilidad nitrogenada, no podría ser independiente del momento del muestreo o requeriría de alguna corrección por condición ambiental previa. Cabe aclarar que, salvo en el mes de enero (Fig. 5a y b), las condiciones meteorológicas de los primeros meses del año 2009 fueron más parecidas a las históricas que las del año 2007. Podría entonces suponerse que las dinámicas de COP y Nan observadas en 2009 son las que podrían esperarse en años normales.

Los rendimientos de maíz fueron más elevados en 2007 que en 2009 (8,93 y 7,74 Mg ha⁻¹, respectivamente, Tabla 4). Las condiciones hídricas del año fueron más favorables en el año 2007, especialmente en el período crítico del cultivo (aproximadamente mes de enero de 2008 y 2010 para los años 2007 y 2009, respectivamente, Figura 5a y b). Esto fue particularmente notorio bajo LC dado que el

déficit hídrico en enero de 2010 redujo los rendimientos bajo este SL (en promedio 10,3 y 7,66 Mg ha⁻¹ para 2007 y 2009, respectivamente, Tabla 4) mientras que casi no los afectó bajo SD (7,55 y 7,83 Mg ha⁻¹ para 2007 y 2009, respectivamente, Tabla 4). La SD se asocia a una mejor conservación del agua almacenada en el perfil del suelo (Blevins & Frye, 1993) y esto seguramente fue el motivo de la estabilidad de los rendimientos bajo este SL entre años.

Bajo SD (con N o sin N) y bajo LC sin N, no hubo relación significativa entre los rendimientos del maíz y los contenidos de COP y de Nan a 0-20 cm determinados en julio y a la siembra del cultivo. Sin embargo, sí hubo una relación inversa significativa entre los rendimientos de maíz bajo LC con N y COP y Nan a 0-20 cm, lo que se atribuye a la importante diferencia de rendimiento bajo LC con N entre años (Tabla 4). Calviño y Echeverría (2003) mostraron que los rendimientos de maíz se acercaban al máximo posible cuando el Nan era de 48,0 mg kg⁻¹. Asimismo, Sainz Rozas *et al.* (2008) informaron que cuando el Nan tenía ese valor, el umbral de contenido de N de nitrato en el estadio V6 del maíz para respuesta a la fertilización con N, era más bajo. De acuerdo con estos autores, la falta de relación significativa entre el rendimiento con el Nan a 0-

Tabla 4. Rendimiento del cultivo de maíz (a 14,5% de humedad) bajo dos sistemas de labranza y con dos dosis de fertilización nitrogenada en dos años. Los valores entre paréntesis indican desvío estándar. Letras diferentes acompañando a los valores indican diferencias significativas ($P < 0,05$) dentro de cada año. LC: labranza convencional, SD: siembra directa.

Table 4. Corn yield (at 14,5% moisture) under two different tillage systems and two nitrogen fertilization rates in two years. Values between brackets indicate standard deviation. Different letters next to values indicate significant differences ($P < 0,05$) within each year. LC: conventional tillage, SD: no-tillage.

Año	Fertilización nitrogenada	Rendimiento de maíz		
		Sistema de labranza		
		LC	SD	Promedio
----- Mg ha ⁻¹ -----				
2007	Sin N	8,47 (0,62)	5,59 (0,36)	7,03 b (1,65)
	Con N	12,15 (0,42)	9,36 (0,40)	10,83 a (1,49)
	Promedio	10,31 a (2,07)	7,55 b (2,17)	-
2009	Sin N	6,55 c (0,64)	6,23 d (0,41)	-
	Con N	8,77 b (0,60)	9,43 a (0,53)	-

20 cm podría atribuirse a que los niveles de esta variable estuvieron por encima o cercanos a los $48,0 \text{ mg kg}^{-1}$.

Sin embargo, hubo relación entre la respuesta en grano del maíz al agregado de N y los niveles de COP y Nan a 0-20 cm en los muestreos de julio y a la siembra del cultivo (Fig. 6). Dichas relaciones no fueron en general significativas con el COP, pero sí lo fueron con Nan. Esto coincide con lo informado por Domínguez *et al.* (2006b) pero no era esperable según Calviño y Echeverría (2003) ya que los niveles de Nan superaron, en general, el umbral de respuesta a N indicado por estos autores ($48,0 \text{ mg kg}^{-1}$). Coincidiendo con Domínguez *et al.* (2006b) la resolución de las ecuaciones de regresión para respuesta 0 indica que los umbrales de respuesta a la fertilización nitrogenada son, primero, diferenciales entre SL y, segundo, mucho mayores que $48,0 \text{ mg kg}^{-1}$ ($134,2$ y $96,7 \text{ mg kg}^{-1}$ para SD y $78,9$ y $58,6 \text{ mg kg}^{-1}$ para LC en los muestreos de julio y a la siembra, respectivamente). Las diferencias observadas entre momentos de muestreo y entre años (Fig. 6) estarían indicando que la utilización de Nan como contribución al diagnóstico de fertilidad nitrogenada requeriría una pro-

fundización de los estudios para ajustar los momentos de muestreo y tener en consideración la variabilidad relacionada con las condiciones previas al muestreo.

CONCLUSIONES

La escasa variación en el tiempo de COP a las distintas profundidades, parecería indicar que esta variable podría ser utilizada como indicador de salud de suelo relacionada con las prácticas de manejo, independientemente de las condiciones del año y del momento de muestreo. No obstante, el uso del Nan para tal fin y/o como complemento del diagnóstico de la fertilidad nitrogenada a efectos de recomendación de fertilización, requeriría evaluar mejor la relación con el momento de muestreo y las condiciones previas. La posible variación de sus niveles de acuerdo con las condiciones previas al muestreo estaría condicionando la relación con el comportamiento de los cultivos y con otras variables del suelo (p.e. COP).

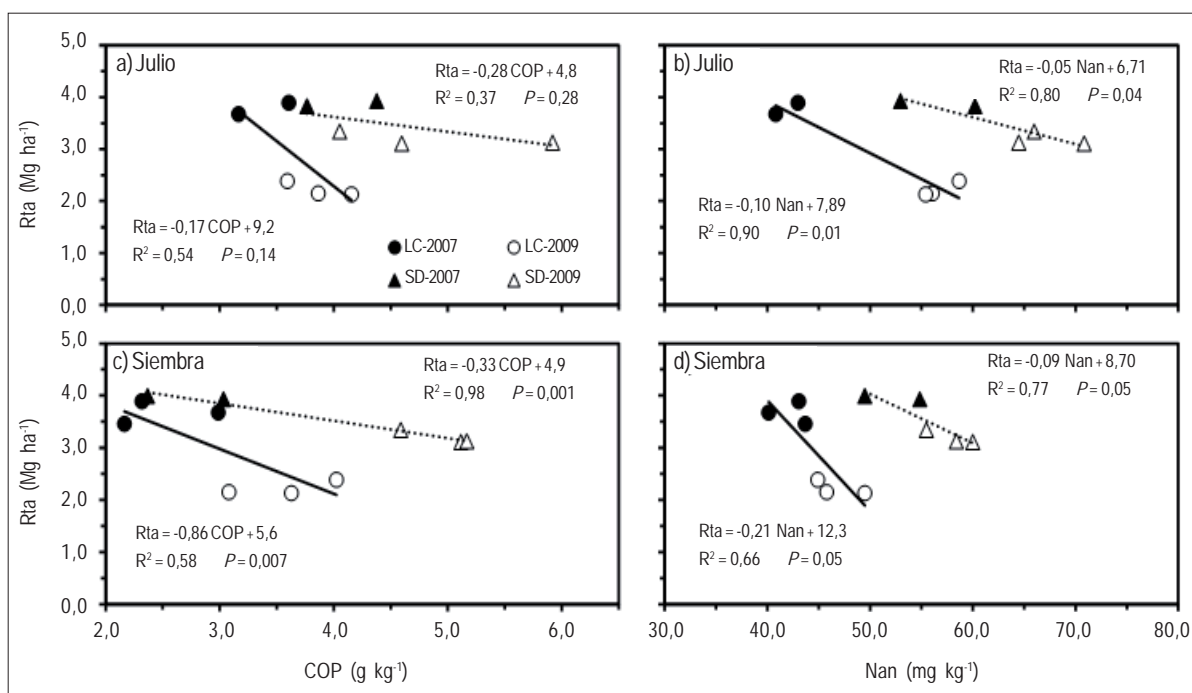


Figura 6. Respuesta en grano de maíz al agregado de nitrógeno (Rta) en función de los contenidos de carbono orgánico particulado (COP) y el nitrógeno de amonio liberado en incubación anaeróbica (Nan) a 0-20 cm de profundidad en los muestreos de julio (a y b, respectivamente) y a la siembra del maíz (c y d, respectivamente).

Figure 6. Corn yield response to nitrogen fertilization (Rta) as a function of particulate organic carbon content (COP) and of ammonium nitrogen produced during anaerobic incubation (Nan) at 0-20 cm depth in July (a and b, respectively) and at corn planting (c and d, respectively).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado parcialmente por los proyectos de investigación de la Universidad Nacional de Mar del Plata N° AGR466/14, los del INTA PNCYO-1127032 y PNSUELO-1134023 y el del FONCYT PICT 2012-1092. Los autores desean expresar su agradecimiento a la Sra. Marta Latorraca y al Ing. Agr. Medardo Pérez Ramírez por su colaboración en el procesamiento y análisis de algunas de las muestras utilizadas para este trabajo. El primer autor desea expresar su gratitud al Programa Campus Iberus, del consorcio de Universidades del Valle del Ebro, España, por facilitarle las condiciones para la confección del presente trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- Agostini, MA; GA Studdert & GF Dominguez. 2010a. Efecto de diferentes sistemas de labranza sobre algunas propiedades físicas en un suelo del Sudeste Bonaerense. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Santa Fe, 31 de mayo al 4 de junio de 2010. En CD.
- Agostini, MA; GA Studdert & GF Dominguez. 2010b. Cambios en algunas propiedades físicas de un suelo del Sudeste Bonaerense asociados a distintos sistemas de cultivo. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Santa Fe, 31 de mayo al 4 de junio de 2010. En CD.
- Agostini, MA; MG Monterubbianesi; GA Studdert & SJ Maurette. 2014. Un método simple y práctico para la determinación de densidad aparente. *Ci. Suelo* 32(2): 171-176.
- Álvarez, R & CR Álvarez. 2000. Soil organic matter pools and their association with carbon mineralization kinetics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 184-189.
- Bonde, TA & T Rosswal. 1987. Seasonal variation of potentially mineralizable nitrogen in four cropping systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 1508-1514.
- Blevins, RL & WW Frye. 1993. Conservation tillage: an ecological approach to soil management. *Adv. Agron.* 51: 33-78.
- Buyanovsky, GA & GH Wagner. 1986. Post-harvest residue input to cropland. *Plant Soil* 93: -65.
- Buyanovsky, GA & GH Wagner. 1997. Crop residue input to soil organic matter in the Sanborn field. In: EA Paul; K Paustian; ET Elliott & CV Cole (eds) Soil Organic Matter in Temperate Ecosystems: Long-term Experiments in North America. Pp. 73-83. CRC Press, Boca Raton, Florida, EEUU.
- Calviño, PA & HE Echeverría. 2003. Incubación anaeróbica del suelo como diagnóstico de la respuesta a nitrógeno del maíz bajo siembra directa. *Ci. Suelo* 21: 24-29.
- Cambardella, CA & ET Elliott. 1992. Particulate soil organic matter. Changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 777-783.
- Casado-Murillo, N & A Abril. 2013. Decomposition and carbon dynamics of crop residue mixtures in a semiarid long term no-till system: effects on soil organic carbon. *Open Agric. J.* 7(Suppl. 1-M3): 11-21.
- Corre, MD; R Schnabel & WL Stout. 2002. Spatial and seasonal variation of gross nitrogen transformations and microbial biomass in a Northeastern US grassland. *Soil Biol. Biochem.* 34: 445-457.
- 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: 1-11.
- Domínguez, G.F. & G.A. Studdert. 2006. Balance de carbono en un Molisol bajo labranza convencional. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta-Jujuy, 19 al 22 de septiembre de 2006. En CD.
- Domínguez, GF; GA Studdert; MJ Eiza; NV Diovisalvi & N Fioriti. 2006a. Relación entre la materia orgánica y el rendimiento de maíz. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta-Jujuy, 19 a 22 de septiembre de 2006. En CD.
- Domínguez, GF; GA Studdert; MV Cozzoli & NV Diovisalvi. 2006b. Relación entre el nitrógeno potencialmente mineralizable y el rendimiento de maíz. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta-Jujuy, 19 a 22 de septiembre de 2006. En CD.
- Domínguez GF; NV Diovisalvi; GA Studdert & MG Monterubbianesi. 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. 1996. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: JW Doran & AJ Jones (eds) Methods for Assessing Soil Quality. SSSA Special Publication N° 49. Pp. 25-37. Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wisconsin, USA.
- Doran, JW; M Sarrantonio & MA Liebig. 1996. Soil health and sustainability. *Adv. Agron.* 56: 1-54.
- Echeverría, HE; NF San Martín & R Bergonzi. 2000. Métodos rápidos de estimación de nitrógeno potencialmente mineralizable en suelos. *Ci. Suelo* 18: 9-16.
- Fabrizzi, KP; A Morón & FO García. 2003. Soil carbon and nitrogen organic fractions in degraded vs. non-degraded Mollisols in Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 1831-1841.
- Franzluebbers, AJ. 2005. Soil organic carbon sequestration and agricultural greenhouse gas emissions in the southeastern USA. *Review. Soil Till. Res.* 83: 120-147.
- Gregorich, EG; MH Beare; UF McKim & JO Skjemstad. 2006. Chemical and biological characteristics of physically uncomplexed organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 975-985.
- INTA. 1979. Carta de Suelos de la República Argentina. Hoja: 3757-31, Balcarce., Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca, Buenos Aires, Argentina. s/p.
- Keeney, DR. 1982. Nitrogen-availability indexes. En: AL Page (ed), Methods of Soil Analysis. Part 2, Chemical and microbiological properties. Agronomy Monograph 9. Pp. 711-733. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, EEUU.
- Keeney, DR & DW Nelson. 1982. Nitrogen inorganic forms. En: AL Page (ed). Methods of soil analysis. Part 2, Chemical and microbiological properties. Agronomy Monograph 9. Pp. 643-698. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, EEUU.
- Litell, RC; GS Milliken; WW Stroup; RD Wolfinger & O Schabenberger. 2006. SAS® for Mixed Models, 2nd ed., SAS Institute Inc., Cary, EEUU.
- Reussi Calvo, N; H Sainz Rozas; H Echeverría & A Berardo. 2013. Contribution of anaerobically incubated nitrogen to the diagnosis of nitrogen status in spring wheat. *Agron. J.* 105: 1-8.

- Ritchie, SW & JJ Hanway. 1982. How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Technology. Coop. Ext. Service. Special report N°48. Ames, Iowa, EEUU. 21 pp.
- Roldán, MF; GA Studdert; CC Videla; S San Martino & LI Picone. 2014. Distribución de tamaño y estabilidad de agregados en molisoles bajo labranzas contrastantes. *Ci. Suelo* 32(2): 247-257.
- Sainz Rozas, HR; PA Calviño; HE Echeverría; PA Barbieri & M Redolatti. 2008. Contribution of anaerobically mineralized nitrogen to the reliability of planting or presidedress soil nitrogen test in maize. *Agron. J.* 100(4): 1020-1025.
- Sánchez, S.R.; G.A. Studdert & H.E. Echeverría. 1996. Descomposición de residuos de cosecha en un Argiudol típico. *Ci. Suelo* 14: 63-68.
- SAS. 2004. SAS Online Doc®, Versión 9. <www.sas.com>. SAS Institute Inc., Cary, EEUU.
- Schlichting, E; HP Blume & K Stahr. 1995. Bodenkundliches Praktikum. Paul Parey. Hamburgo, Alemania. 209 pp.
- 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 Till. Res.* 79: 7-31.
- Studdert, GA. 2014. Materia orgánica y sus fracciones como indicadores de uso sustentable de suelos del Sudeste Bonaerense. Actas XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Bahía Blanca, Buenos Aires, 5 al 9 de mayo de 2014. En CD.
- Studdert, GA; GF Domínguez; N Fioriti; MV Cozzoli; NV Diovisalvi & MJ Eiza. 2006. Relación entre nitrógeno anaeróbico y materia orgánica de Molisoles de Balcarce. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta-Jujuy, 19 al 22 de septiembre de 2006. En CD.
- Wander, M. 2004. Soil organic matter fractions and their relevance to soil function. *In: K Magdoff & RR Weil (eds) Soil organic matter in sustainable agriculture.* Pp. 67-102. CRC Press, Boca Raton, Florida, EEUU.
- Weil, RR & F Magdoff. 2004. Significance of soil organic matter to soil quality and health. *In: K Magdoff & RR Weil (eds) Soil organic matter in sustainable agriculture.* Pp. 1-43. CRC Press, Boca Raton, Florida, EEUU.

