



Universidad Nacional de Lomas de Zamora

Facultad de Ciencias Agrarias

Carrera: Ingeniería Agronómica

Espacio de Prácticas Profesionales

Trabajo Final de Grado

Título

“Efecto de la intensificación de las rotaciones en el nivel de carbono orgánico total del suelo y sus fracciones a distintas profundidades”

Autor: Rodríguez, Francisco Tomás

Director: Ing. Agr. Rodríguez, Hernán A.

Codirector: Mgtr. Ing. Agr. De Grazia, Javier

Lomas de Zamora, 10 de Octubre de 2024

Contenido

<u>AGRADECIMIENTOS</u>	2
<u>RESUMEN</u>	3
<u>INTRODUCCIÓN</u>	5
<u>Hipótesis general</u>	9
<u>Hipótesis específicas</u>	9
<u>Objetivo general</u>	9
<u>Objetivos específicos</u>	9
<u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	11
<u>Descripción del área de estudio y de los tratamientos</u>	11
<u>Carbono orgánico del suelo</u>	12
<u>Expresión de los resultados</u>	14
<u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	15
<u>Variación del carbono orgánico total del suelo y de las distintas fracciones</u>	15
<u>Patrón de distribución vertical del carbono orgánico del suelo y de las distintas fracciones</u>	17
<u>CONCLUSIONES</u>	22
<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	23

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es un cierre de todo lo que fueron estos últimos años de mi vida, y quiero que los agradecimientos abarquen todo el proceso transcurrido.

Quiero mencionar en un principio a mis padres, desde que tengo memoria me convencieron de estudiar una carrera universitaria y me han despojado de preocupaciones, entre ellas económicas, que pude tener durante estos años; y a mis abuelos y tíos, que fueron parte de la educación de mis padres, y por ende de la mía.

También agradezco a mis hermanos, el querer darles un ejemplo fue parte de la motivación que tuve.

Agradezco a todos los compañeros y en especial a aquellos que considero amigos, dentro del ámbito universitario y a los que están de toda la vida aún más.

Por último, quiero agradecer a todos los profesionales que trabajan para que la Facultad Ciencias Agrarias sea mejor, son ellos quienes me han formado como profesional: directivos, docentes y no docentes. Quiero expresar mi profunda gratitud a las cátedras que me han brindado la oportunidad de enriquecer mis estudios: Botánica Morfológica, Cerealicultura y Edafología. Además de eso, fue en esta última donde culminé mi carrera universitaria con este Trabajo Final de Grado.

RESUMEN

El carbono orgánico del suelo (COS) tiene fundamental importancia en las propiedades del suelo y en el cambio climático. El uso agrícola suele reducir el contenido de COS debido a altas tasas de extracción y menores aportes de C, la excesiva remoción con destrucción de la estructura, variaciones en la fracción biológica del suelo, mayor descomposición de residuos y menor protección física por labranzas. Sin embargo, la intensificación de rotaciones y la inclusión de cultivos de servicio pueden aumentar los niveles de COS. A su vez, el COS se lo puede categorizar según su tamaño. En este trabajo se dividió en Fracción Gruesa, Fracción Media y Fracción Fina, y su proporción puede variar con la profundidad. Así, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la intensificación de la rotación sobre el contenido de COS y sus fracciones. Para ello, se realizó un ensayo en la localidad de Pergamino con 4 tratamientos: rotación de tercios (Tercios), rotación intensificada con cultivo de cobertura (Int c/COB), rotación intensificada con cultivo de renta (Int c/RENTA) y rotación intensificada con cultivos de cobertura y de renta (Int C & R). Se tomaron muestras de 0-10 cm y 10-20 cm de profundidad, dónde se determinó el carbono orgánico total (COT) y el CO de sus distintas fracciones (COFG, COFM y COFF). Los valores de CO se expresaron en unidades porcentuales (%) y en unidades de masa sobre superficie (Mg ha^{-1}). Los tratamientos no mostraron diferencias significativas en el contenido de COT, pero sí se evidenciaron diferencias en las fracciones. Para la profundidad superficial, el COFM en % mostró los menores valores para Int C & R en comparación con el resto de los tratamientos (Tercios, Int c/Cob e Int c/Renta). Sin embargo, al expresarse en Mg ha^{-1}

¹, estas diferencias desaparecieron. Se demostró la importancia de expresar los valores adecuadamente y surgieron nuevas hipótesis a raíz de los resultados obtenidos.

INTRODUCCIÓN

La MOS, o más específicamente el carbono orgánico del suelo (COS)¹, aporta beneficios para las propiedades del suelo. Podemos mencionar que dentro de las propiedades físicas favorece la estabilidad estructural, la porosidad, la infiltración y la retención de agua (Montiel, 2000); interviene en las propiedades químicas aumentando la capacidad de intercambio y la capacidad buffer del suelo (Martínez *et al.*, 2008); y es esencial en las propiedades biológicas, alimentando organismos del suelo y participando en los ciclos de nutrientes para las plantas (Borie *et al.*, 1999).

Por otra parte, contribuye a la mitigación del cambio climático, ya que su acumulación implica una reducción de gases de efecto invernadero. Se estima que, en los suelos de la región Pampeana, aún se podría capturar el carbono equivalente C-CO₂ emitido a la atmósfera por Argentina durante 160 años (Banco Mundial, 2018), principalmente relacionado a los suelos de climas húmedos y texturas finas de esta región (Alvarez & Berhongaray, 2021).

Para mitigar la disminución del COT se recomienda implementar un manejo adecuado del suelo con la aplicación de prácticas sostenibles entre otras herramientas. Los atributos propios de la materia orgánica del suelo (MOS) focalizaron la atención en prácticas agronómicas conservacionistas. En este contexto, la de mayor impacto es la intensificación de las rotaciones² y, con ello, la incorporación de los cultivos de servicio³. Estas prácticas demostraron aumentos en

¹ Por ser el COS el principal componente de la MOS. Además, en este trabajo será presentado como COT (Carbono Orgánico Total).

² Incremento del número de cultivos por unidad de tiempo (Agostini *et al.*, 2014).

los niveles de la MOS (González *et al.*, 2018) y se espera que también afecte su calidad modificando sus componentes menos estables (Janzen *et al.*, 1998), con variaciones en profundidad.

Normalmente, el uso agrícola de la tierra provoca el descenso de los niveles del COT (Landriscini *et al.*, 2016), afectando así las propiedades mencionadas en párrafos anteriores. Este descenso se atribuye a una menor entrada de carbono, mayor descomposición de residuos de cosecha y disminución de la protección física por labranzas (Jiang *et al.*, 2011).

La secuencia de cultivos, al alternar diferentes especies en la rotación, influye directamente en el balance de COT. En sistemas agrícolas se espera un aumento o mantenimiento de los niveles de carbono al tener mayor aporte de residuos generados por los cultivos (Alvarez *et al.*, 2011) y la permanencia de estos residuos mediante siembra directa continua (Steinbach & Alvarez, 2006). Por otro lado, los sistemas agrícolas ganaderos con inclusión de pasturas contribuyen favorablemente sobre el contenido de COT (Studdert *et al.*, 1997; Haynes, 2000).

Asimismo, la intensificación de esta secuencia repercute en dicho balance. Los llamados cultivos de servicio son una forma de intensificar las rotaciones agrícolas en los sistemas de producción, que además permiten incrementar rendimientos en cultivos sucesores como el maíz (Rimski-Korsakov *et al.*, 2016). En general, estos cultivos se siembran con un objetivo en particular, como la supresión de malezas, la disminución de la erosión hídrica y/o eólica, el aporte de carbono y/o nitrógeno y las

³ Sinónimo de cultivos de cobertura. Se siembran en los periodos de barbechos, no se cosechan, y aportan servicios (Piñeiro *et al.*, 2020).

mejoras en propiedades mecánicas del suelo, entre otras (Bertolotto & Marzetti, 2017).

En contraste a esto, Baigorria (2018) propone que no en todos los casos los cultivos de servicio son beneficiosos, y debe tenerse en cuenta la localización, el sistema de producción, la especie y su respectivo manejo. Entre las posibles desventajas están el consumo de agua, la dificultad de implantación del cultivo siguiente, los cambios en el manejo y la aparición de plagas y enfermedades (Bertolotto & Marzetti, 2017).

De esta manera, conocer el contenido de COT es un parámetro que aporta un panorama general pero incompleto en cuanto su calidad. Para ello, el fraccionamiento del COT por métodos físicos y/o químicos es valioso para su caracterización y monitoreo, debido a que algunas fracciones son más sensibles al efecto de distintas prácticas de manejo (Duval, 2015). Cambardella & Elliott (1992), propusieron un fraccionamiento por tamaño de partículas separando dos fracciones. Una fracción lábil, cuyo tamaño varía entre 50 μm y 2000 μm , que denominaron “Carbono Orgánico Particulado”. La otra es la asociada a la fracción mineral, que incluye a aquellas que están por debajo de los 50 μm , denominadas “Carbono Orgánico Humificado”. La fracción más gruesa es la menos estable puesto que se mineraliza fácilmente, renovándose rápidamente, en meses o años (Krull *et al.*, 2003), responsable de los mayores cambios producto del uso de la tierra (Haynes, 2000; Six *et al.*, 2002). En cambio, aquella asociada a la fracción mineral se mantiene más estable en el suelo durante decenas de años (Baisden & Amundson, 2003; Bruun *et al.*, 2007) y su proporción aumenta a medida que los suelos tienen mayores porcentajes de partículas finas (Alvarez & Berhongaray, 2021).

En este trabajo se ha propuesto diferenciar al Carbono Orgánico Particulado en 2 fracciones por tamaño y grado de labilidad, separando aquellos restos de reciente incorporación, de escasa transformación y de mayor tamaño (105-2000 μm) denominados Fracción Gruesa (FG), de aquellos materiales algo más transformados, de menor dinámica y más estabilidad, denominada Fracción Media (FM) y cuyo tamaño varía de 105 μm a 53 μm . La fracción de Carbono Orgánico Humificado asociada a la fracción mineral, se denominó Fracción Fina (FF) y presenta un mayor grado de transformación y, por ende, es la más estable.

Asimismo, el contenido de COT y su fraccionamiento guarda estrecha relación con la profundidad. La estabilidad aumenta en profundidad, explicado por una mayor eficiencia de estabilización del carbono orgánico (Alvarez & Berhongaray, 2021), asociada al aumento de arcilla y disminución del nivel de aportes orgánicos (Shahbaz *et al.*, 2017). Para Rumpel & Kögel-Knabner (2011), entre los factores más relevantes para la protección del COT a mayores profundidades están los microorganismos y la actividad enzimática extracelular.

Hipótesis general

Las rotaciones intensificadas aumentan la cantidad y modifican la calidad del carbono orgánico del suelo.

Hipótesis específicas

- Las rotaciones intensificadas generan aumentos en el carbono orgánico total y variaciones de diversa magnitud en las diferentes fracciones físicas del carbono orgánico.
- Las rotaciones intensificadas provocan variaciones en la distribución vertical del carbono orgánico total y de sus diferentes fracciones físicas.

Objetivo general

- Evaluar el efecto de la intensificación de la rotación sobre el contenido de carbono orgánico total del suelo y sus fracciones.

Objetivos específicos

1. Analizar el contenido de carbono orgánico total del suelo y de sus distintas fracciones físicas en rotaciones de cultivos agrícolas con diferente grado de intensificación.

2. Estudiar el patrón de distribución vertical del contenido de carbono orgánico total del suelo y sus fracciones.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio y de los tratamientos

El ensayo se realizó en la localidad de Pergamino, provincia de Buenos Aires, sobre un suelo Serie Urquiza, clasificado taxonómicamente como Argiudol típico, con un Horizonte A de 28 cm de espesor, una clase textural franco limoso, con un contenido de materia orgánica de 3,1 % y 0,177 % de nitrógeno total, el pH es ligeramente ácido y no presenta síntomas de hidromorfismo (INTA, 2022). El diseño experimental utilizado fue un Diseño Completamente Aleatorizado (DCA), con cuatro tratamientos y dos repeticiones, y las unidades experimentales consistieron en parcelas de 25 m de ancho por 50 m de largo con una superficie de 1250 m² cada una. Los tratamientos evaluados fueron diferentes rotaciones o secuencias de cultivos agrícolas, de acuerdo con situaciones frecuentes y posibles para la subregión Pampa Ondulada, con diferente intensidad de cultivos. Los cuatro tratamientos definidos fueron: 1) rotación intensificada con cultivo de cobertura (Int c/COB), en donde se realizaron cinco cultivos, de los cuales tres son de cosecha en tres años; 2) rotación intensificada con cultivos de cobertura y de renta (Int C & R), en donde se realizaron cinco cultivos, de los cuales cuatro fueron de renta (es decir que algunos de los cultivos antecesores agregados a la rotación son también de cosecha), en tres años; 3) rotación intensificada con cultivo de renta (Int c/RENTA), en donde se realizaron cinco cultivos, y los cinco fueron de renta; y 4) rotación de tercios (Tercios), en donde se realizaron cuatro cultivos de cosecha en tres años (Tabla 1). Todas las rotaciones finalizaron con el mismo cultivo para eliminar el posible efecto del cultivo sobre las variables a evaluar. La rotación de tercios es una de las más

utilizadas por los productores de la zona y, en este trabajo, se la utilizó como tratamiento testigo. Todas las rotaciones se llevaron a cabo bajo siembra directa y se aplicó el mismo manejo (fertilización, pulverización y cosecha) según el cultivo implantado. Los cultivos de Vicia y Cobertura fueron terminados mediante el secado químico. Para la evaluación del efecto de estos tratamientos se extrajeron, mediante uso del barreno, muestras compuestas de suelo a dos profundidades, de 0 – 10 cm y 10 – 20 cm. También se determinó la densidad aparente mediante el “Método del Cilindro” (Blake & Hartge, 1986).

Tabla 1 Detalle de los cultivos sembrados a lo largo de las tres campañas correspondientes a cada tratamiento realizado en el ensayo.

CAMPAÑA	Intensificada con Cultivos de Cobertura	Intensificada con Cultivos de Renta y Cobertura	Intensificada con Cultivos de Renta	Tercios
1	Cobertura ⁴ /Soja	Cobertura/Soja	Trigo/Soja	Trigo/Soja
2	Vicia/Maíz	Arveja/Maíz	Arveja/Maíz	Maíz Temprano
3	Soja 1°	Soja 1°	Soja 1°	Soja 1°

Carbono orgánico del suelo

Se determinó el carbono orgánico total (COT) y el carbono orgánico de las fracciones, representado por el carbono orgánico de la FG (2000 µm – 105 µm), el carbono orgánico de la FM (105 µm – 53 µm), ambas correspondientes al carbono orgánico particulado, y el carbono orgánico de la FF (menor a 53 µm), perteneciente al carbono orgánico humificado.

⁴ Por Cobertura hace referencia a mezcla de Avena y Centeno

Las muestras extraídas a campo se llevaron al laboratorio y fueron secadas al aire, molidas y tamizadas con malla de 2000 μm para su homogeneización. A partir de estas muestras, se realizó una nueva molienda y tamizado por 500 μm para la determinación de COT. Para el fraccionamiento por tamaño de partícula, se partió de una masa de 50 g de suelo de la muestra tamizada por 2000 μm siguiendo la metodología propuesta por Rodríguez *et al.* (2019).

Esta metodología consiste en colocar 50 g de suelo en recipiente hermético de 120 ml, y agregar 10 esferas de vidrio de cuatro mm de diámetro, 100 ml de agua destilada y mantener la suspensión en agitación durante 16 horas para lograr la dispersión de las partículas. Una vez finalizado este tiempo, se realiza un tamizado en húmedo, mediante aspersores, de la suspensión del suelo a través de una batería de tamices, el primero de 103 μm para separar la FG, y el segundo de 53 μm para separar la FM, y el resto de la suspensión, que es la FF, se recolecta en un recipiente. Todas estas fracciones se llevan a estufa hasta peso constante a una temperatura menor a 60 °C para eliminar la humedad, posteriormente, se pesan y se tamizan por 500 μm . Con el cociente entre la masa de cada fracción y la masa inicial se obtiene la relación de masa de cada fracción.

Sobre las muestras tamizadas por 500 μm , se determinó el carbono orgánico por la metodología descrita por la norma IRAM-SAGPyA 29571-2 (2009), basado en el método de combustión en húmedo de Walkley & Black (1934). Se determinó así el carbono orgánico “oxidable” (dado que con el método utilizado la oxidación técnicamente no es completa) de la muestra original (COT) y de cada fracción (COFG, COFM, y COFF).

Expresión de los resultados

Los contenidos de carbono orgánico se expresaron en unidades porcentuales (%) y en unidades de masa sobre superficie (Mg ha^{-1}) teniendo en cuenta la densidad aparente a la profundidad de muestreo (Eiza *et al.*, 2006) (Ecuación 1).

$$\text{CO (\%)} * \text{DAP (g cm}^{-3}\text{)} * 10 (\text{Mg cm}^3 \text{ g}^{-1} \text{ ha}^{-1}) = \text{CO (Mg ha}^{-1}\text{)}$$

Ecuación 1

El efecto de los tratamientos (rotaciones agrícolas) y de la profundidad sobre el contenido del carbono orgánico se evaluó mediante ANOVA. En caso de existencia de diferencias significativas, se calculó la diferencia mínima significativa (DMS) con un nivel de probabilidad de $p < 0,05$. Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variación del carbono orgánico total del suelo y de las distintas fracciones

En el ensayo se obtuvo un rango de valores de COT de 1,75-2,01 % de suelo tomando la profundidad de 0 – 20 cm. Los valores de contenido de COT se pueden transformar a materia orgánica total (MOT) mediante la constante de Van Bemmelen, cuyo valor es de 1,724 (Marbán & Ratto, 2005), a fin de poder comparar los valores obtenidos con los presentados por otros autores. La transformación de los valores mostró un rango de 3,02 - 3,47 %. Los valores medios de MOT en la zona, para la misma profundidad es de 4,03 %, para los suelos prístinos, y de 2,67 %, en suelos con prolongada historia agrícola muestreados en 2018 (Sainz-Rosas *et al.*, 2019). Los valores obtenidos en el estudio realizado, se encuentran por encima del valor medio de suelos con similar historia agrícola.

La rotación de cultivos no tuvo efecto sobre el COT, pero sí se encontraron diferencias significativas entre las fracciones del carbono orgánico. El tratamiento Int C & R fue el único en mostrar un efecto sobre el COFM y COFF, mostrando diferencias estadísticamente significativas. Con respecto a la rotación de Tercios, este tratamiento presentó disminuciones de 29 % y 10 % respectivamente para cada fracción (Tabla 2).

Tabla 2. Valores medios de contenido de carbono orgánico total del suelo (%) y de sus fracciones para los distintos tratamientos en la profundidad 0-20 cm.

Tratamiento	COFG	COFM	COFF	COT
Int c/COB	0,13 A	0,08 A	1,74 A	1,95 A
Int C & R	0,13 A	0,05 B	1,57 B	1,75 A
Int c/RENTA	0,12 A	0,08 A	1,81 A	2,01 A
Tercios	0,16 A	0,07 A	1,75 A	1,99 A

Int c/COB: Rotación intensificada con cultivo de cobertura; Int C & R: Rotación intensificada con cultivos de cobertura y de renta; Int c/RENTA: Rotación intensificada con cultivo de renta; Tercios: Rotación de tercios. COFG: Carbono orgánico fracción gruesa. COFM: Carbono orgánico fracción media. COFF: Carbono orgánico fracción fina. COT: Carbono Orgánico Total. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos según DMS ($p < 0,05$).

Cuando los valores de contenido de carbono orgánico son afectados por la densidad aparente del suelo (Tabla 3), el COFM mantiene la diferencia estadísticamente significativa entre el tratamiento Int C & R y el resto de los tratamientos. Con respecto a la rotación de Tercios, presenta una disminución de 25 %. Sin embargo, no sucede lo mismo con el COFF, que no presenta diferencias estadísticamente significativas.

Tabla 3. Valores medios de contenido de carbono orgánico total de suelo (Mg ha^{-1}) y de sus fracciones para los distintos tratamientos en la profundidad 0-20 cm.

Tratamiento	COFG	COFM	COFF	COT
Int c/COB	1,4 A	0,8 A	20,7 A	22,9 A
Int C & R	1,6 A	0,6 B	19,1 A	21,3 A
Int c/RENTA	1,4 A	0,9 A	21,9 A	24,2 A
Tercios	1,7 A	0,8 A	20,4 A	23,0 A

Int c/COB: Rotación intensificada con cultivo de cobertura; Int C & R: Rotación intensificada con cultivos de cobertura y de renta; Int c/RENTA: Rotación intensificada con cultivo de renta; Tercios: Rotación de tercios. COFG: Carbono orgánico fracción gruesa. COFM: Carbono orgánico fracción media. COFF: Carbono orgánico fracción fina. COT: Carbono Orgánico Total. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos según DMS ($p < 0,05$).

En cuanto a los valores relativos del contenido de carbono orgánico para las diferentes fracciones y el contenido de COT (Tabla 4), no se presentan diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos.

Tabla 4. Valores relativos de las diferentes fracciones de Carbono orgánico para los distintos tratamientos (0 - 20 cm de profundidad).

Tratamiento	COFG . COT -1	COFM . COT -1	COFF . COT -1
Int c/COB	0,06 A	0,03 A	0,91 A
Int C & R	0,07 A	0,03 A	0,90 A
Int c/RENTA	0,05 A	0,03 A	0,92 A
Tercios	0,07 A	0,03 A	0,90 A

Int c/COB: Rotación intensificada con cultivo de cobertura; Int C & R: Rotación intensificada con cultivos de cobertura y de renta; Int c/RENTA: Rotación intensificada con cultivo de renta; Tercios: Rotación de tercios. COFG: Carbono orgánico fracción gruesa. COFM: Carbono orgánico fracción media. COFF: Carbono orgánico fracción fina. COT: Carbono Orgánico Total. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos según DMS ($p < 0,05$).

Lo encontrado mantiene coherencia con lo registrado por Alvarez *et al.* (2017), quienes, en los experimentos con cultivos de cobertura de corta duración, menor a cinco años (como en este trabajo), no encontraron valores significativamente superiores para el contenido de carbono en las rotaciones intensificadas. Duval (2015) tampoco observó diferencias estadísticamente significativas entre rotaciones de menor y de mayor nivel de intensificación, al comparar los valores relativos de las fracciones COFG y COFM.

Patrón de distribución vertical del carbono orgánico del suelo y de las distintas fracciones

Al discriminar las variables bajo estudio por profundidad, el contenido de COT presentó un rango de 1,96 a 2,40 % de suelo en la profundidad 0 – 10 cm y de 1,53 a 1,64 % en la profundidad 10 – 20 cm. Estos valores, convertidos a MOT, presentaron un rango de 3,38% a 4,14% y de 2,64% a 2,83% para las profundidades de 0-10 cm y 10-20 cm, respectivamente. Tomando como referencia tratamientos similares para la misma localidad y profundidades (Duval, 2015), los valores obtenidos en este ensayo se encuentran por encima de los promedios.

Para la profundidad de 0 - 10 cm, el efecto de los tratamientos no mostraron diferencias estadísticamente significativas sobre el contenido de COFG, COFF y COT. Únicamente el tratamiento Int C & R presentó diferencias estadísticamente significativas para el COFM, evidenciado una disminución de 13 % con respecto a la rotación de Tercios (Tabla 5).

Tabla 5. Valores medios de contenido de carbono orgánico total del suelo (%) y de sus fracciones para los distintos tratamientos discriminando por profundidad (de 0-10 cm y de 10-20 cm).

Tratamiento	COFG	COFM	COFF	COT
0 – 10 cm				
Int c/COB	0,20 A	0,13 A	1,93 A	2,27 A
Int C & R	0,14 A	0,08 B	1,75 A	1,96 A
Int c/RENTA	0,18 A	0,13 A	2,09 A	2,40 A
Tercios	0,26 A	0,12 A	1,96 A	2,34 A
10 – 20 cm				
Int c/COB	0,05 A	0,02 A	1,55 A	1,63 A
Int C & R	0,12 A	0,02 A	1,39 A	1,53 A
Int c/RENTA	0,06 A	0,03 A	1,53 A	1,62 A
Tercios	0,06 A	0,03 A	1,55 A	1,64 A

Int c/COB: Rotación intensificada con cultivo de cobertura; Int C & R: Rotación intensificada con cultivos de cobertura y de renta; Int c/RENTA: Rotación intensificada con cultivo de renta; Tercios: Rotación de tercios. COFG: Carbono orgánico fracción gruesa. COFM: Carbono orgánico fracción media. COFF: Carbono orgánico fracción fina. COT: Carbono Orgánico Total. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos según DMS ($p < 0,05$).

Cuando los valores de contenido de carbono orgánico fueron afectados por la densidad aparente del suelo (Tabla 6), no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos para cada una de las variables evaluadas en las diferentes profundidades.

Tabla 6. Valores medios de contenido de carbono orgánico total del suelo (Mg ha^{-1}) y de sus fracciones para los distintos tratamientos discriminando por profundidad (de 0-10 cm y de 10-20 cm).

Tratamiento	COFG	COFM	COFF	COT
0 – 10 cm				
Int c/COB	2,1 A	1,3 A	20,1 A	23,6 A
Int C & R	1,5 A	0,8 A	18,8 A	21,1 A
Int c/RENTA	1,9 A	1,4 A	21,9 A	25,2 A
Tercios	2,6 A	1,2 A	19,7 A	23,5 A
10 – 20 cm				
Int c/COB	0,7 A	0,3 A	21,2 A	22,2 A
Int C & R	1,7 A	0,3 A	19,5 A	21,5 A
Int c/RENTA	0,8 A	0,5 A	21,8 A	23,1 A
Tercios	0,9 A	0,4 A	21,1 A	22,4 A

Int c/COB: Rotación intensificada con cultivo de cobertura; Int C & R: Rotación intensificada con cultivos de cobertura y de renta; Int c/RENTA: Rotación intensificada con cultivo de renta; Tercios: Rotación de tercios. COFG: Carbono orgánico fracción gruesa. COFM: Carbono orgánico fracción media. COFF: Carbono orgánico fracción fina. COT: Carbono Orgánico Total. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos según DMS ($p < 0,05$).

Al discriminar por profundidad los valores relativos del contenido de carbono orgánico para las diferentes fracciones y el contenido de COT (Tabla 7), tampoco se presentan diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos.

Tabla 7. Valores relativos de las diferentes fracciones de Carbono orgánico para los distintos tratamientos discriminando por profundidad (de 0-10 cm y de 10-20 cm).

Tratamiento	COFG . COT -1	COFM . COT -1	COFF . COT -1
0 – 10 cm			
Int c/COB	0,09 A	0,06 A	0,85 A
Int C & R	0,07 A	0,04 A	0,89 A
Int c/RENTA	0,07 A	0,06 A	0,87 A
Tercios	0,11 A	0,05 A	0,84 A
10 – 20 cm			
Int c/COB	0,03 A	0,02 A	0,95 A
Int C & R	0,08 A	0,02 A	0,90 A
Int c/RENTA	0,04 A	0,02 A	0,94 A
Tercios	0,04 A	0,02 A	0,94 A

Intc/COB: Rotación intensificada con cultivo de cobertura; Int C & R: Rotación intensificada con cultivos de cobertura y de renta; Int c/RENTA: Rotación intensificada con cultivo de renta; Tercios: Rotación de tercios. COFG: Carbono orgánico fracción gruesa. COFM: Carbono orgánico fracción media. COFF: Carbono orgánico fracción fina. COT: Carbono Orgánico Total. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos según DMS ($p < 0,05$).

Ninguno de los tratamientos evaluados en este trabajo mostró cambios significativos en el contenido de COT. Tampoco para la variable más sensible (COFG debido a su condición de labilidad). Además, ninguno de los tratamientos intensificados mostró valores significativamente superiores a la rotación de Tercios para ninguna de las variables estudiadas e incluso las diferencias encontradas resultaron menores al valor de tal tratamiento.

Salvagiotti *et al.* (2013) observaron que la introducción de cultivos de cobertura en rotaciones que ya incluían gramíneas no impactaba al COFG. Sumado a esto, el efecto de la siembra directa podría haber homogeneizado los tratamientos, como se evidenció en el estudio de Eiza *et al.* (2006), para la profundidad de 0 – 20 cm (también válido para 0 – 10 cm y 10 – 20 cm). En su investigación, encontraron que

la disminución en el contenido de CO de fracciones superiores a 53 μm , debido a los efectos de las rotaciones, fue menor en los primeros años bajo siembra directa. Por lo tanto, la siembra directa parecería incidir en este aspecto.

No obstante, se pudo diferenciar al tratamiento Int C & R, con valores significativamente menores en cuanto a COFM y COFF (Tabla 2) y en COFM (Tabla 3 y 5). Esto podría atribuirse a una posible diferencia en la calidad de los residuos entre los tratamientos, ya que esta rotación tiene una mayor proporción de leguminosas; y como demostraron en el ensayo de Espinoza *et al.* (2007), una baja relación carbono/nitrógeno (C/N) de los residuos no favorece la protección de las fracciones más lábiles.

CONCLUSIONES

Bajo las condiciones evaluadas, la inclusión de cultivos de cobertura en las rotaciones no demostró ser una práctica que por sí sola garantice el aumento el contenido de carbono orgánico total. Sería aconsejable continuar los estudios con ensayos a largo plazo.

Las rotaciones no afectaron el contenido de Carbono Orgánico de la Fracción Gruesa, la fracción más lábil. Al separar por profundidad, tampoco afectaron el contenido de Carbono Orgánico de la Fracción Fina. Únicamente, afectaron el contenido de Carbono Orgánico de la Fracción Media cuando su valor fue expresado como concentración porcentual (%). Sin embargo, al expresar estos valores en unidades de masa de carbono en superficie (Mg ha^{-1}), y al discriminar las variables por profundidad, estas diferencias se pierden. Concluimos con esto, la importancia de afectar los valores por la densidad aparente del suelo a fin de poder evaluar tanto en unidades de masa de carbono en superficie (Mg ha^{-1}) como porcentuales (%) y evitar conclusiones erróneas.

Surgen nuevas hipótesis, se podría decir que el Carbono Orgánico de una fracción relativamente lábil como la Fracción Media, se ve más afectado por la baja relación C/N u otro efecto particular provocado por los diferentes cultivos de la rotación, que otras fracciones. Evidenciando así el efecto de la calidad de los residuos sobre la fracción de tamaño intermedio. De todas formas, sería conveniente profundizar los estudios sobre estas variables para poder realizar alguna afirmación.

BIBLIOGRAFÍA

- Agostini, M., Domínguez, G., Studdert, G., & Tourn, S. (2014). Intensificación del uso del suelo en el Sudeste Bonaerense: impacto sobre algunas variables edáficas. *Actas XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina.
- Alvarez , R., Steinbach, H., & Bono, A. (2011). An artificial neural network approach for predicting soil carbon budget in agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 75, 965–975.
- Alvarez, R., & Berhongaray, G. (2021). Soil organic carbon sequestration potential of Pampean soils: comparing methods and estimation for surface and deep layers. *Soil Research*, 59(4), 346-358.
- Alvarez, R., Steinbach, H., & de Paepe, J. (2017). ¿ Son convenientes los cultivos de cobertura en la Región Pampeana?: Un análisis de la información existente. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 26, 17-20.
- Baigorria, T. (2018). *Los SI y los NO en los cultivos de servicio*. [Archivo de video]. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=5nLo47Ljnng>.
- Baisden, W., & Amundson, R. (2003). An analytical approach to ecosystem biogeochemistry modeling. *Ecological Applications*, 13, 649–663.
- Banco Mundial. (2018). *CO2 emissions by country*. Obtenido de <https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.PC>

- Bertolotto, M., & Marzetti, M. (2017). Cultivos de Cobertura. Bases para su manejo en sistemas de producción. *Manejo de malezas problema, VII*. REM-Aapresid.
- Blake, G., & Hartge, K. (1986). Bulk density. *Methods of Soil Analysis, Part, 1 - Physical and Mineralogical Methods, 2nd Edition, Agronomy Monograph 9, American Society of Agronomy-Soil Science Society of America, Madison*, 363-382.
- Borie, G., Aguilera, S., & Peirano, P. (1999). Actividad biológica en suelos. *Frontera Agrícola*, 5, 29-32.
- Bruun, S., Thomsen, I., Christensen, B., & Jensen, L. (2007). In search of stable soil organic carbon fractions: a comparison of methods applied to soils labeled with ¹⁴C for 40 days or 40 years. *European Journal of Soil Science*, 59, 247–256.
- Cambardella, C., & Elliot, E. (1992). Particulate soil organicmatter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 56, 777-783.
- Di Rienzo, J., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M. R., & Robledo, C. W. (2020). *InfoStat versión 2018*. Obtenido de Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.: <http://www.infostat.com.ar>.
- Duval, M. (2015). *Contenido, calidad y dinámica de las fracciones orgánicas como indicadores de calidad de suelos bajo diferentes manejos en siembra directa*. Obtenido de <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/2382>

- Eiza, M., Studdert, G., & Domínguez, G. (2006). Dinámica de la materia orgánica del suelo bajo rotaciones mixtas: II. Materia orgánica particulada. *Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*, 3-5.
- Espinoza, Y., Lozano, Z., & Velásquez, L. (2007). Efecto de la rotación de cultivos y prácticas de labranza sobre las fracciones de la materia orgánica del suelo. *Interciencia*, 32(8), 554-559.
- González , H., Restovich, S., & Portela, S. (2018). Utilización de cultivos de servicio invernales como alternativa para mejorar la estabilidad estructural del suelo. *Revista Técnica Red de Innovadores Cultivos de Invierno* , 9-19.
- Haynes, R. (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.
- INTA - Instituto de Suelos - CIRN. (2022). Obtenido de Cartas de Suelos República Argentina - Provincia de Buenos Aires (1.0) [Data set]. Zenodo.: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6353509>
- IRAM - SAGPyA, N. (2009). Determinación de materia orgánica en suelos. Parte 2. Determinación de carbono orgánico oxidable por mezcla oxidante fuerte, escala semi-micro. Primera Edición. In: s.l.:s.n.
- Janzen, H., Campbell, C., Izaurralde, R., Ellert, B., Juma , N., McGill, W., & Zentner, R. (1998). Management effects on soil C storage on the Canadian Prairies. *Soil Tillage Res.*, 47:181-95.

- Jiang, X., Wright, A., Wang, J., & Li, Z. (2011). Long-term tillage effects on the distribution. *Catena*, 87, 276–280.
- Krull, E., Baldock, J., & Skjemstad, J. (2003). Importance of the analyses for modelling carbon turnover. *Functional Plant Biology*, 30, 207–222.
- Landriscini, M., Galantini, J., & Duval, M. (2016). Variación de las fracciones orgánicas resistentes en suelos de la Región Pampeana. *XXV CONGRESO ARGENTINO DE LA CIENCIA DEL SUELO, Ordenamiento territorial. Un desafío para la ciencia del suelo*, 25.
- Marbán, L., & Ratto, S. (2005). TECNOLOGÍAS EN ANÁLISIS DE SUELOS: ALCANCE A LABORATORIOS AGROPECUARIOS. - 1a ed. – Buenos Aires: Asoc. Argentina de la Ciencia.
- Martínez, E., Fuentes, J., & Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 68-96.
- Montiel, N. (2000). *Bases del enfoque ecosistémico para la restauración ambiental*. Michoacán, México: Instituto Nacional de Ecología.
- Piñeiro, G. (2020). *Cultivos de servicio. Seminario Online: Red de Cultivos de Servicios [Archivo de video]*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=K2u4PBIPVVU&t=3197s>
- Rimski-Korsakov, H., Alvarez, C., & Lavado, R. (2016). Cultivos de cobertura invernales en la región pampeana argentina. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, 21, 2-6.

- Rodríguez, H., De Grazia, J., Prack-McCormick, B., Gagey, M., Barrios, M., & Sokolowski, A. C. (2019). Variables químicas en suelos de Santa Catalina bajo diferentes usos. *Asociación Argentina de Sedimentología*, 54-57.
- Rumpel, C., & Kögel-Knabner, I. (2011). Deep soil organic matter—a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. *Plant and soil*, 338, 143-158.
- Sainz-Rosas, H. R., Eyherabide, M., Larrea, G. E., Martinez-Cuesta, N., Angelini, H. P., Reussi-Calvo, N. I., & Wyngaard, N. (2019). *Relevamiento y determinación de propiedades químicas en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana*. Obtenido de https://repositorio.inta.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12123/11824/INTA_CR_BsAsSur_EEABalcarce_Sainz%20Rozas_HR_Relevamiento_determinaci%3f%b3n_propiedades_suelo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Salvagiotti, F., Vernizzi, A., Bodrero, M., & Bacigaluppo, S. (2013). Cambios en el corto plazo en distintas fracciones de la materia orgánica en respuesta a la inclusión de cultivos de cobertura en secuencias basadas en soja. *Contribuciones de los cultivos de cobertura a la sostenibilidad de los sistemas de producción.*, 12, 88-91.
- Shahbaz, M., Kuzyakov, Y., & Heitkamp, F. (2017). Decrease of soil organic matter stabilization with increasing inputs: mechanisms and controls. *Geoderma*, 304, 76-82.
- Six, J., Conant, R., Paul, E., & Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant Soil*, 241, 155–176.

- Steinbach, H., & Alvarez, R. (2006). Changes in soil organic carbon contents and nitrous oxide emissions after introduction of no-till in Pampean agroecosystems. *Journal of Environmental Quality*, 35, 3–13.
- Studdert, G., Echeverría, H., & Casanova, E. (1997). Crop-pasture relations for sustaining the quality and productivity of a Typic Argiudoll. *Soil Science Society of America Journal*, 61, 1466–1472.
- Walkley, A., & Black, Y. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29-37.
- Zotarelli, L., Alves, B., Urquiaga, S., Boddey, R., & Six, J. (2007). Impact of tillage and crop rotation on light fraction and intra-aggregate soil organic matter in two Oxisols. *Soil and Tillage Research*, págs. 95(1-2), 196-206.