



XXIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo

Suelos... Huellas del pasado, desafíos del futuro

San Fernando del Valle de Catamarca,
Prov. de Catamarca, Argentina
21 al 24 de mayo de 2024



"INTENSIFICACIÓN AGRÍCOLA Y SU IMPACTO EN EL STOCK DE CARBONO DEL SUELO"

Maury, M.^{12*}, Lorenzon, C.A.¹, Conde, M.B.¹, Bacigalupo, S.³, Salvagiotti, F.²³, Faggioli, V.S.¹

¹ EEA INTA Marcos Juárez; ² CONICET; ³ EEA INTA Oliveros; * Ruta Provincial 12, km 3, (2580) Marcos Juárez, Prov. de Córdoba, maury.mariana@inta.gob.ar

RESUMEN: El suelo es el principal reservorio de carbono (C) y cumple una función clave para mitigar el cambio climático a través del secuestro de C. Las prácticas de intensificación agrícola sustentables (IAS), incorporación de cultivos de cobertura (CC) y fertilización nitrogenada en gramíneas (FN), buscan mejorar la productividad de los sistemas, la fertilidad del suelo y favorecer el secuestro de C. El objetivo del trabajo fue evaluar el impacto a largo plazo de la inclusión de CC y FN, en una secuencia agrícola con alta frecuencia de gramíneas sobre el C del suelo. Las muestras fueron tomadas en junio de 2021, en un experimento de INTA Oliveros iniciado en 2006. La rotación fue maíz- soja – trigo/ soja en siembra directa y los tratamientos fueron: monocultivo de soja, CC/maíz- soja- trigo/soja (CC-SEC) y maíz-soja-trigo/soja (SEC), y dos estrategias de FN para maíz y trigo: N1 y N2. Las profundidades de muestreo fueron: 0-3,5, 3,5-7,5, 7,5-15 y 15-30 cm de suelo. Se determinó: aportes de C de residuos vegetales, carbono orgánico del suelo total (COS) y particulado > 53 µm (COPf), y stock de C a 0-30 cm. Los aportes de C aumentaron significativamente con IAS: CC- SEC N2> CC- SEC N1> SEC N2> SEC N1> Monocultivo. COS y COPf mostraron tendencia a aumentar su concentración con las IAS. CC y FN incrementaron significativamente COS solo en 3,5-7,5 cm (p valor < 0,05). CC y FN no tuvieron efectos significativos sobre COPf (p valor > 0,05). El monocultivo presentó los menores valores para todas las variables, aunque no se diferenció significativas de SEC y CC-SEC. Stock de C a 0-30 cm tuvo respuesta significativa a CC, siendo CC-SEC > SEC en 3 Mg ha⁻¹. Los resultados demuestran la importancia de las prácticas de IAS, principalmente la incorporación de CC, para favorecer el secuestro de C.

PALABRAS CLAVE: cultivo de cobertura, fertilización nitrogenada, secuencias de cultivo.

INTRODUCCION

El suelo es el mayor reservorio de carbono (C) y cumple una función clave para mitigar el cambio climático a través del secuestro de C, transformando el CO₂ de la atmósfera a carbono orgánico del suelo (COS) como biomasa vegetal, necromasa de microorganismos, residuos y desechos orgánicos (Stockmann, U. et al., 2013). Las prácticas de manejo de los sistemas productivos regulan la calidad y cantidad de C que retorna al suelo. Dado que la producción agrícola ocupa gran parte de la superficie terrestre, pequeños cambios en el contenido de COS van a impactar significativamente en el cambio climático.

El COS es el indicador de calidad edáfica por excelencia y tiene múltiples beneficios sobre propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo. En Argentina, según los años bajo agricultura, se midieron disminuciones de 25-36% de COS en suelos agrícolas comparados con suelos prístinos (Wyngaard, N. et al., 2022). Estas pérdidas se asocian principalmente a sistemas productivos con labranzas, secuencias agrícolas con baja o nula rotación de cultivos (monocultivo de soja) incluyendo cultivos con bajo aporte de biomasa, largos periodos de barbecho, como así también la fertilización inadecuada de los cultivos. El monocultivo de soja ha demostrado mayores pérdidas de COS que aquellas secuencias de

Organizado por:



AACCS
ASOCIACION ARGENTINA
CIENCIA DEL SUELO



UNCA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE
CATAMARCA



FCA



INTA
Instituto Nacional de
Tecnología Agropecuaria

cultivos con predominancia de gramíneas, las cuales favorecen el retorno de C al sistema (Crespo, C. et al., 2021).

La intensificación agrícola sustentable (IAS) busca optimizar el uso de los recursos ambientales e insumos externos para mantener o incrementar los rendimientos de los cultivos por unidad de superficie y conservar los recursos (Cassman & Grassini, 2020). La incorporación de cultivos de cobertura (CC) a la rotación y la fertilización mineral (FM) son prácticas de IAS que aportan, de manera directa o indirecta, C al suelo. La rotación de cultivos y los CC aumentan el tiempo de ocupación del suelo y favorecen el aporte de residuos vegetales aéreos y subterráneos que incrementa el COS. Diversos trabajos han mostrado en el mediano plazo el efecto positivo de la inclusión de CC en situaciones de monocultivo de soja sobre COS (Crespo et al., 2021), sin embargo, los beneficios del CC podrían no manifestarse en rotaciones con alta proporción de gramíneas. Por su parte, las estrategias de fertilización buscan mantener un adecuado balance de nutrientes, favoreciendo la fertilidad química y la producción de los cultivos, lo cual se correlaciona con un mayor aporte de residuos, que incrementaría el COS.

Debido a que los cambios en los contenidos de COS ocurren lentamente, para cuantificar el efecto de las prácticas de manejo sobre el Stock de C (Mg ha^{-1}) del suelo se requiere de largos períodos de estudio, por tal motivo los ensayos de larga duración (ELD) son una herramienta fundamental en este tipo de estudios (Poulton, P. et al., 2024). El COS puede ser caracterizado por diferentes fracciones, siendo las fracciones lábiles o particuladas indicadores tempranos de los cambios en C del suelo. El objetivo del trabajo fue evaluar el efecto a largo plazo de la inclusión de cultivos de cobertura y diferentes estrategias de fertilización nitrogenada en una rotación agrícola con alta frecuencia de gramíneas en siembra directa, sobre el contenido de COS total y particulado $> 53 \mu\text{m}$ (COPf) a diferentes profundidades y el Stock de C (Mg ha^{-1}) a 0-30 cm.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se trabajó con un ELD iniciado en el 2006 en INTA Oliveros, sobre un suelo Argiudol Típico Serie Maciel. La rotación fue Maíz- Soja – Trigo/ Soja en siembra directa y los tratamientos fueron: monocultivo de soja (monocultivo), CC/Maíz- Soja – Trigo/Soja (CC-SEC) y Maíz- Soja – Trigo/Soja (SEC), y dos estrategias de fertilización nitrogenada (FN) en gramíneas: N1 (fertilización con 92 y 160 Kg N ha^{-1} según umbral de respuesta para rendimientos de hasta 4000 y 9500 en trigo y maíz, respectivamente) y N2 (fertilización con 135 y 190 Kg N ha^{-1} según umbral de respuesta para rendimientos de hasta 5000 y 11000 kg ha^{-1} en trigo y maíz, respectivamente). Además, los cultivos fueron fertilizados con fósforo a la siembra. El CC que se utilizó hasta 2016 fue trigo previo a soja, y desde 2017 fue vicia previo a maíz. El diseño experimental es de bloques completos aleatorizado con tres repeticiones.

El muestreo de suelo se realizó en junio de 2021, luego de la cosecha de soja de segunda. Se utilizó un barreno de 2.5 cm de diámetro, y en cada parcela se tomaron muestras de suelo compuestas por 15 piques. Las profundidades de muestreo fueron: 0- 3,5; 3,5-7,5; 7,5-15 y 15-30 cm.

Se determinó: aporte de C de los residuos aéreos y radiculares según rendimiento para cada cultivo y el índice cosecha de 0,36, 0,34 y 0,53 para soja, trigo y maíz respectivamente. Carbono orgánico del suelo (COS) (Walkley y Black, 1934). Asimismo, para las profundidades 0-3,5, 3,5-7,5 y 7,5-15 cm, se realizó fraccionamiento físico para separar la fracción orgánica asociada a limo más arcilla y la fracción orgánica particulada $> 53 \mu\text{m}$ (COPf) según el método descrito por Cambardella y Elliott (1992), en esta fracción se determinó Carbono por LECO. La densidad aparente no se diferenció por los tratamientos en ninguna profundidad ($>0,05$) (datos no mostrados). El contenido de COS total y COPf en las distintas profundidades se expresó en g kg^{-1} de suelo y mientras que Stock de C en Mg ha^{-1} , se corrigió por masa equivalente de suelo según Webster, R. (2008).

Los datos fueron analizados con INFOSTAT (Di Renzo et al., 2019) aplicando los modelos lineales mixtos. Para la diferencia entre medias se utilizó el test LSD Fisher al 5% y se probó la significancia de efecto CC, FN y la interacción CC* FN. También se hicieron 2 contrastes:

SEC (SEC N1 + SEC N2) vs Monocultivo y CC-SEC (CC-SEC N1 y CC-SEC N2) vs monocultivo.

RESULTADOS Y DISCUSION

Carbono aportado por los residuos aéreos y de las raíces

En la Figura 1 se observan los aportes de C acumulados para los diferentes tratamientos analizados. Se hallaron diferencias significativas (p -valor $< 0,05$) en el aporte de C total (aéreos + raíces) por efecto de CC y FN. El aporte de C de CC-SEC $>$ SEC en 7,5 % y en $N2 > N1$ en 7 %. A pesar de que la interacción $CC * FN$ no fue significativa (p valor $> 0,05$), el menor aporte de C total correspondió a SEC N1 ($49,4 \text{ Mg ha}^{-1}$) y el mayor a CC N2 ($57,1 \text{ Mg ha}^{-1}$). Estos resultados sugieren que la incorporación de CC a la rotación tiene mayor efecto que la fertilización, pero ante una misma rotación las mayores dosis de fertilización favorecen los ingresos de C (Semmartin, M. et al., 2023). El efecto del CC sobre los ingresos de C, va a depender del cultivo seleccionado y el tiempo de ocupación (Blanco – Canqui et al., 2015), a pesar de que el aumento del tiempo de ocupación fue breve, alcanzó para aumentar significativamente los ingresos de C.

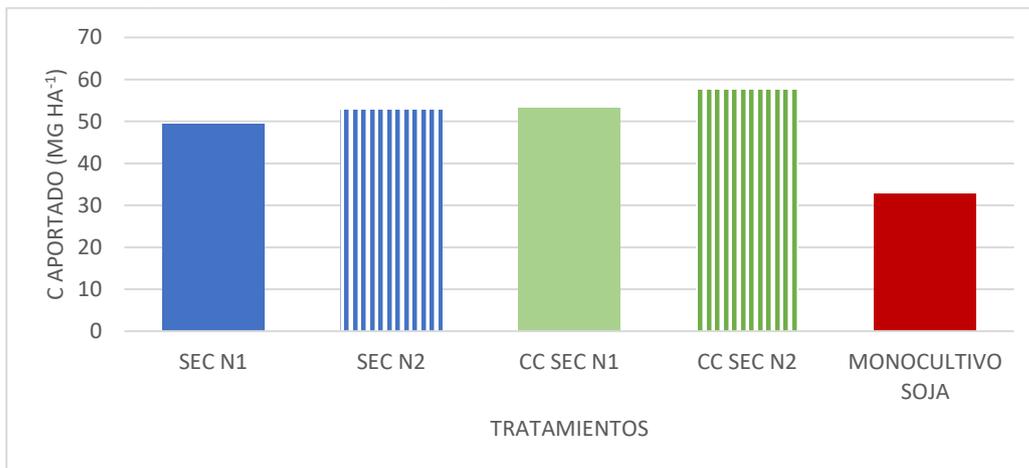


Figura 1. Aporte de C total (Mg ha^{-1}) para los tratamientos: SEC N1, SEC N2, CC- SEC N1, CC-SEC N2 y monocultivo. SEC: maíz- soja- trigo/soja; CC-SEC: CC/maíz- soja- trigo/soja; Monocultivo: soja continua; N1: estrategia de fertilización nitrogenada con 92 kg N ha^{-1} en trigo y 160 kg N ha^{-1} en maíz; N2: estrategia de fertilización nitrogenada con 135 kg N ha^{-1} para trigo y 190 kg N ha^{-1} para maíz.

El aporte de C total de SEC y CC-SEC se diferenció de los aportes del monocultivo (p valor $< 0,05$). En los años analizados, SEC y CC-SEC aportaron en total $18,1$ y $22,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ más que el monocultivo, respectivamente.

El aporte de C anual ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) para cada tratamiento fue de $4,75 > 4,42 > 4,38 > 4,1 > 2,7 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para los tratamientos CC-SEC N2, CC-SEC N1, SEC N2, SEC N1 y monocultivo respectivamente. La bibliografía sugiere que los aportes anuales deben ser superiores a 3 Mg ha^{-1} para mantener los niveles de COS (Cazorla, C. et al., 2017), por lo que los valores hallados muestran que el aporte del monocultivo no alcanza el valor crítico. Además, el monocultivo aporta anualmente un 36 y 42 % menos de C al sistema que una rotación de cultivos Maíz- Soja- Trigo/ Soja o CC-Maíz-Soja- Trigo/Soja, respectivamente.

Carbono orgánico del suelo total (COS) y particulado $> 53 \mu\text{g}$ (COPf)

La concentración de COS (g Kg^{-1}) tuvo respuesta significativa a CC y FN en 3,5-7,5 cm de suelo. Siendo COS en CC- SEC un 6,6% superior a SEC y en N2 un 7 % superior a N1 (Figura 2, a y b). Es de destacar que en este trabajo se muestra el efecto de incorporar CC aun en secuencias de cultivos maíz- soja- trigo/soja, trabajos previos reportaron incrementos de COS al comparar rotaciones de cultivo vs un monocultivo de soja, aunque no lograron

diferenciar el COS entre rotaciones de cultivo o un monocultivo con CC (Serri, D. et al., 2022).

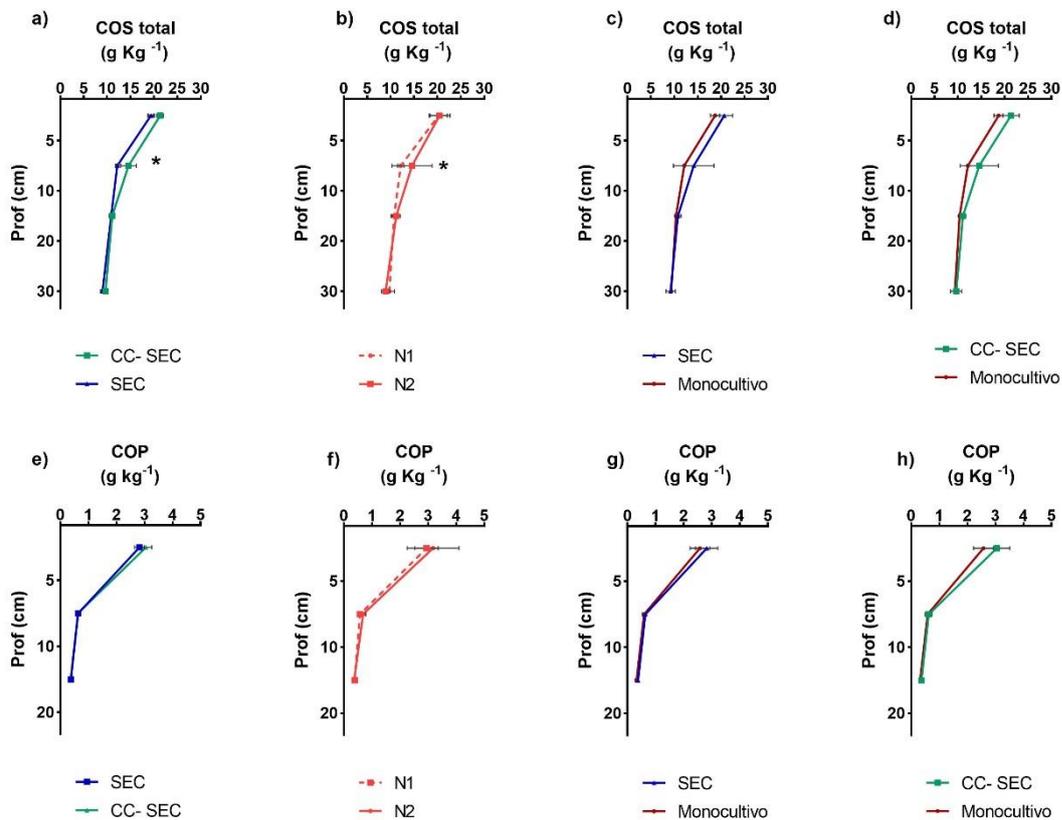


Figura 2. Valores medios de concentración COS (g kg^{-1}) para 0- 3,5, 3,5- 7,5, 7,5- 15 y 15- 30 cm de profundidad del suelo: a) SEC vs CC- SEC; b) N1 vs N2; c) monocultivo vs SEC; d) monocultivo vs CC-SEC. Valores medios de concentración de COPf (g Kg^{-1}) para 0- 3,5, 3,5- 7,5 y 7,5- 15 cm de profundidad del suelo: e) SEC vs CC- SEC; f) N1 vs N2; g) monocultivo vs SEC; h) monocultivo vs CC-SEC. CC: cultivo de cobertura; SEC: secuencia maíz- soja- trigo/soja; Monocultivo: soja continua; N1: estrategia de fertilización nitrogenada con 92 kg N ha^{-1} en trigo y 160 kg N ha^{-1} en maíz; N2: estrategia de fertilización nitrogenada con 135 kg N ha^{-1} para trigo y 190 kg N ha^{-1} para maíz. (*) indica diferencia estadísticamente significativa ($p \text{ valor} < 0,05$).

Por otro lado, el monocultivo presentó la menor concentración de COS en las profundidades evaluadas. A pesar de no hallar diferencias significativas al contrastar monocultivo vs SEC y CC-SEC ($p \text{ valor} > 0,05$), la tendencia muestra que, en la profundidad 0-3,5 cm, COS de SEC y CC-SEC fueron un 3,5% y 14% superior al del monocultivo. Los aumentos COS en las SEC y CC-SEC respecto al monocultivo están estrechamente relacionados a los mayores ingresos de C en las secuencias.

El COPf es considerado un indicador de mayor sensibilidad que el COS, sin embargo, en este estudio no se diferenció significativamente entre los tratamientos a ninguna profundidad evaluada. Los valores de las medias para cada tratamiento muestran la tendencia a aumentar COPf con las prácticas de IAS en el siguiente orden: CC SEC N2 > SEC N2 > CC SEC N1 > SEC N1, siendo el rango de los valores desde 3,76 a 2,88 g Kg^{-1} para CC SEC N2 y SEC N1 respectivamente, en la profundidad 0-3,5 cm. En el mismo sentido, se observa que CC-SEC 10 % superior a SEC (Figura 2, e) y en N2 fue 18% superior a N1 (Figura 2, f), sin diferenciarse estadísticamente ($p \text{ valor} > 0,05$). Estudios previos tampoco hallaron diferencias en COPf al evaluar incorporación de CC a secuencias agrícolas o dosis medias vs altas de N (Li, J. et al., 2018). Este último autor reportó que el mayor efecto de la

fertilización sobre COPf se observa cuando se utilizan fertilizantes orgánicos (compost / residuos vegetales) o la combinación de fertilización orgánica + mineral.

Como era de esperar, el menor contenido de COPf correspondió al monocultivo, siendo la tendencia en SEC y CC-SEC superiores al de monocultivo en 18 y 31% respectivamente para 0-3,5 cm (Figura 2, g y h), (p valor $> 0,05$). Esto, al igual que COS, puede explicarse debido a los menores aportes de C en el monocultivo.

Stock de C (Mg ha^{-1})

En cuanto al stock de C a 0-30 cm (Mg ha^{-1}) tuvo respuesta significativa a la inclusión de CC (Figura 3, a), donde el stock de C en CC-SEC fue 9% superior a SEC ($39,4 > 36,6 \text{ Mg ha}^{-1}$). Lo cual reafirma lo reportado por Poeplau & Don (2015) en sistemas de agricultura continua los CC son una opción prometedora para secuestrar C. Al analizar el stock de C (Mg ha^{-1}) para cada profundidad (dato no mostrado), se observó que la interacción CC* FM tuvo efectos significativos en la profundidad 7,5-15 cm, donde el menor stock de C correspondió a SEC N1 ($9,37 \text{ Mg ha}^{-1}$) y el mayor a SEC N2 ($10,99 \text{ Mg ha}^{-1}$), es decir que, en ausencia de CC, los tratamientos se diferenciaron entre sí por la dosis de FN (p valor $< 0,05$).

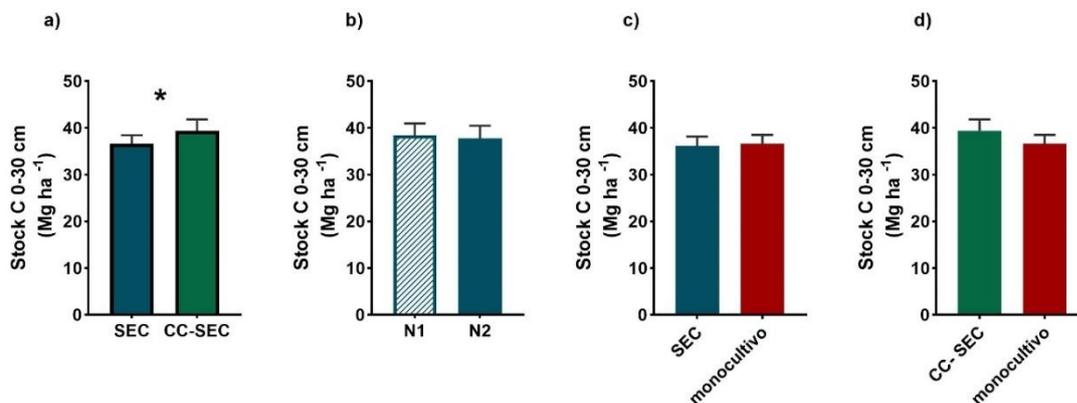


Figura 3. Stock de C (Mg ha^{-1}) para 0-30 cm de profundidad: a) efecto CC: SEC vs CC-SEC); b) efecto FN: N1 vs N2; c) monocultivo vs SEC; d) monocultivo vs CC- SEC. CC: cultivo de cobertura; SEC: secuencia maíz- soja- trigo/soja; Monocultivo: soja continua; N1: estrategia de fertilización nitrogenada con 92 kg N ha^{-1} en trigo y 160 kg N ha^{-1} en maíz; N2: estrategia de fertilización nitrogenada con 135 kg N ha^{-1} para trigo y 190 kg N ha^{-1} para maíz. (*) indica diferencia estadísticamente significativa (p valor $< 0,05$).

Al contrastar el stock de C a 0-30 cm de SEC y CC-SEC vs monocultivo, el menor valor correspondió al monocultivo, sin embargo, no se hallaron diferencias estadísticamente significativas por contraste entre monocultivo ($36,5 \text{ Mg ha}^{-1}$) vs SEC ($36,64 \text{ Mg ha}^{-1}$) o CC-SEC ($39,4 \text{ Mg ha}^{-1}$). Sin embargo, al analizarlo en las diferentes profundidades, en 7-15 cm el stock de C del monocultivo fue 15% inferior al de SEC y CC-SEC ($8,66 < 10,18$ y $10,20 \text{ Mg ha}^{-1}$ monocultivo, SEC y CC-SEC respectivamente) (p valor $< 0,05$). Estos resultados coinciden con los reportados por Novelli, L. E. et al., (2017), quien halló diferencias en stock de C en los primeros centímetros del perfil, según el tipo de suelo, para un Molisol fue en 0-5 cm y en un vertisol en 5-10 cm, pero no se diferenciaron al analizar 0-30 cm de profundidad.

CONCLUSIÓN

Estos resultados demuestran que las prácticas de intensificación sustentables a largo plazo, uso de cultivos de cobertura y estrategias de fertilización nitrogenada, tienen efectos positivos en el stock de C a 0-30 cm de profundidad, incluso en secuencias de cultivos con una alta frecuencia de gramíneas. Específicamente, el stock de C a 0-30 cm aumentó 9% en una secuencia de cultivos de maíz-soja-trigo/soja con cultivos de cobertura en comparación con la misma rotación sin cultivos de cobertura. Al analizar COS y COPf en el suelo, muestran una tendencia similar de aumentar la concentración a medida que aumentaron los

aportes de C a causa de la implementación de las prácticas de IAS, aunque esto solo se observa en los primeros cm del suelo. En todas las variables analizadas, los valores más bajos correspondieron al monocultivo de soja. Este estudio sugiere que las prácticas de IAS, principalmente la inclusión de cultivos de cobertura, son una herramienta prometedora para restaurar el carbono del suelo y mejorar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas.

BIBLIOGRAFIA

- Blanco-Canqui, H., Shaver, T. M., Lindquist, J. L., Shapiro, C. A., Elmore, R. W., Francis, C. A., & Hergert, G. W. (2015). Cover crops and ecosystem services: Insights from studies in temperate soils. *Agronomy journal*, 107(6), 2449-2474.
- Cassman, K. G., & Grassini, P. (2020). A global perspective on sustainable intensification research. *Nature sustainability*, 3(4), 262-268.
- Cazorla, C. R., Cisneros, J. M., Moreno, I. S., & Galarza, C. M. (2017). Mejora en el carbono del suelo y estabilidad de agregados por fertilización y cultivos de cobertura. *Ciencia del suelo*, 35(2), 301-313.
- Crespo, C., Wyngaard, N., Rozas, H. S., Studdert, G. A., Barraco, M., Gudelj, V., ... & Barbieri, P. (2021). Effect of intensified cropping sequences on soil physical properties in contrasting environments. *Catena*, 207, 105690.
- Li, J., Wen, Y., Li, X., Li, Y., Yang, X., Lin, Z., ... & Zhao, B. (2018). Soil labile organic carbon fractions and soil organic carbon stocks as affected by long-term organic and mineral fertilization regimes in the North China Plain. *Soil and Tillage Research*, 175, 281-290.
- Novelli, L. E., Caviglia, O. P., & Piñeiro, G. (2017). Increased cropping intensity improves crop residue inputs to the soil and aggregate-associated soil organic carbon stocks. *Soil and Tillage Research*, 165, 128-136.
- Poeplau, C. & Don, A. (2015). Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops—A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 200, 33-41.
- Poulton, P. R., Johnston, A. E., Glendining, M. J., White, R. P., Gregory, A. S., Clark, S. J., ... & Powlson, D. S. (2024). The Broadbalk Wheat Experiment, Rothamsted, UK Crop yields and soil changes during the last 50 years. *Advances in Agronomy*, 184, 173-298.
- Semmartin, M., Cosentino, D., Poggio, S. L., Benedit, B., Biganzoli, F., & Peper, A. (2023). Soil carbon accumulation in continuous cropping systems of the rolling Pampa (Argentina): The role of crop sequence, cover cropping and agronomic technology. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 347, 108368.
- Serri, D. L., Pérez-Brandan, C., Meriles, J. M., Salvagiotti, F., Bacigaluppo, S., Malmantile, A., & Vargas-Gil, S. (2022). Development of a soil quality index for sequences with different levels of land occupation using soil chemical, physical and microbiological properties. *Applied Soil Ecology*, 180, 104621.
- Stockmann, U., Adams, M. A., Crawford, J. W., Field, D. J., Henakaarchchi, N., Jenkins, M., ... & Zimmermann, M. (2013). The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 164, 80-99.
- Wyngaard, N., Cecilia, C., Hernán, A., Mercedes, E., Gastón, L., Calvo, N. R., ... & Rozas, H. S. (2022). The effect of agriculture on topsoil carbon stocks is controlled by land use, climate, and soil properties in the Argentinean Pampas. *Catena*, 212, 106126.