



Indicadores de sustentabilidad ecológica para diferentes secuencias agrícolas en la región pampeana de Argentina¹

Indicators of ecological sustainability for different agricultural sequences in the Pampean region of Argentina

Silvina Golik², Adriana M. Chamorro², Rodolfo Bezus², Andrea Pellegrini², Axel Voisin³

¹ Recepción: 30 de noviembre, 2021. Aceptación: 25 de abril, 2022. El presente trabajo fue resultado de los proyectos de incentivos A288 y A 348 de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

² Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, La Plata, Provincia de Buenos Aires, Argentina. silvinagolik@yahoo.com.ar (autora para correspondencia; <https://orcid.org/0000-0002-4876-1154>), chamorro@agro.unlp.edu.ar (<https://orcid.org/0000-0002-5475-5754>), bezus@agro.unlp.edu.ar (<https://orcid.org/0000-0002-2946-1690>), aepellegrini@hotmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-1291-5676>).

³ Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Comisión de Investigaciones Científicas, Provincia de Buenos Aires, Argentina. axelvoisin@hotmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-1025-9828>).

Resumen

Introducción. La intensificación de la agricultura con la soja (*Glycine max* L.) como principal componente del sistema de producción provoca perjuicios importantes en el suelo de Argentina y de muchos otros lugares del mundo. **Objetivo.** Evaluar la sustentabilidad ecológica de cuatro secuencias agrícolas, bajo distintos manejos de sus barbechos. **Materiales y métodos.** El ensayo se llevó a cabo en la Estación Experimental J. Hirschhorn de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata (34° 52' LS, 57° 58' LO), Buenos Aires, Argentina, donde desde el año 2011 se ha trabajado con cuatro secuencias de cultivos y, a partir del año 2015, con cuatro manejos distintos de sus barbechos (testigo, compost, cultivo de cobertura sin fertilizante y cultivo de cobertura más fertilizante). Para la evaluación de la sustentabilidad se usaron cinco indicadores: balance de N, P, S y de carbono, además, eficiencia de uso del agua. Asimismo, se calculó el índice de sustentabilidad. **Resultados.** La secuencia cebada (*Hordeum vulgare* L.) / soja (*Glycine max* L.) 2da - maíz (*Zea mays* L.) - soja-trigo (*Triticum aestivum* L.) fue la de mayor sustentabilidad bajo tres de los cuatro manejos. La secuencia trigo / soja 2da – soja – trigo fue la de menor sustentabilidad para todos los manejos realizados. **Conclusión.** Las secuencias analizadas presentaron diferencias en la sustentabilidad ecológica, lo que indica la importancia de la elección de sus componentes en la búsqueda de mejorar la sustentabilidad de los agroecosistemas. La utilización de cultivos de cobertura en los barbechos mejoró la sustentabilidad, cuando se asoció a un mayor uso de fertilizantes y cuando no fue así. El uso de compost tuvo un efecto inmediato menor, ya que solo en la secuencia con mayor frecuencia de soja produjo mejoras en la sustentabilidad.

Palabras clave: balance de carbono, balance de nutrientes, biomasa, eficiencia de uso del agua, rendimiento.



Abstract

Introduction. The intensification of agriculture with soybeans (*Glycine max* L.) as the main component of the productive system causes significant damage to the soil of Argentina and many other parts of the world. **Objective.** To evaluate the ecological sustainability of four agricultural sequences, under different management of their fallows. **Materials and methods.** The trial was carried out at the J. Hirschhorn Experimental Station of the Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata (34° 52' LS, 57° 58' LO), Buenos Aires, Argentina, where since 2011 four crop sequences have been worked with and, as of 2015, with four different managements of its fallows (control, compost, cover crop without fertilizer and cover crop plus fertilizer). For the sustainability evaluation, five indicators were used: N, P, S, and carbon balance, as well as water use efficiency. The sustainability index was also calculated. **Results.** The barley (*Hordeum vulgare* L.) / soybean (*Glycine max* L.) 2nd - corn (*Zea mays* L.) - soybean - wheat (*Triticum aestivum* L.) sequence was the one with the highest sustainability under three of the four management systems. The sequence wheat / soybean 2nd - soybean - soybean - wheat was the one with the least sustainability for all of the management approaches. **Conclusion.** The analyzed sequences presented differences in ecological sustainability, which indicates the importance of choosing its components in the search to improve the sustainability of agroecosystems. The use of cover crops in fallows improved sustainability, when associated with greater use of fertilizers and when it was not. The use of compost had a smaller immediate effect since only in the sequence with the highest frequency of soybeans did it produce improvements in sustainability.

Keywords: carbon balance, nutrient balance, biomass, water use efficiency, yield.

Introducción

En Argentina, la intensificación de la agricultura con el cultivo de soja (*Glycine max* L. Merr.) como principal componente de los sistemas productivos, la mejora permanente de materiales genéticos, la disponibilidad de propuestas biotecnológicas (de manera principal, la soja resistente al glifosato) y el importante aumento de la siembra directa, han ocasionado problemas de diverso grado en los suelos agrícolas (Andrade et al., 2017). En la región pampeana y extra pampeana se registraron disminuciones en los contenidos prístinos de materia orgánica del 40 % a 50 % (Sainz Rosas et al., 2011). A su vez, la extracción de nutrientes con las cosechas de los granos es mayor que los aportes por fertilización. Esto implica un empobrecimiento continuo de nutrientes en el suelo (Cruzate & Casas, 2017).

El cultivo de soja creció a un ritmo acelerado en los últimos años. Pasó de una producción de 31,5 millones de toneladas y 14,5 millones de hectáreas en 2003/2004, a 48,7 millones de toneladas y 16,9 millones de hectáreas en la campaña 2019/2020 (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2021). El avance del monocultivo de soja tuvo un impacto desfavorable en las funciones del suelo y la sostenibilidad del agroecosistema (Álvarez et al., 2015). Solo se restaura alrededor de una cuarta parte de los nutrientes totales extraídos por los granos de esta leguminosa (Cruzate & Casas, 2017). El bajo aporte de rastrojos de este cultivo repercute de forma negativa no solo en el balance de carbono del suelo, sino que lo hace aún más susceptible a la degradación, aumenta la compactación, la pérdida de fertilidad y afecta la estructura del suelo, lo que favorece el encostramiento, con impactos negativos sobre la biodiversidad, produce efectos sobre el acuífero y agrava los problemas de inundaciones (Mengo, 2008).

Si bien este cultivo es el más rentable y de mayor retorno por capital invertido a corto plazo, a largo plazo este proceso no es la mejor alternativa, ya que se contrapone con un desarrollo agropecuario sustentable. Un modelo agrícola se considera sustentable cuando resulta viable a nivel económico, aceptable a nivel social y productivo, que

conservar la base de recursos naturales y preserve la integridad del ambiente en el ámbito local, regional y global (Sarandón & Flores, 2014).

De acuerdo con este escenario, es necesario reforzar la importancia de la rotación de cultivos. Las secuencias que incluyen cereales como el trigo (*Triticum aestivum* L.), la cebada (*Hordeum vulgare* L.) y la avena (*Avena sativa* L.), son importantes por los beneficios que generan sobre el sistema productivo y su papel fundamental para promover el mantenimiento de propiedades del suelo, lo que permite una productividad estable en el tiempo. La relación carbono/nitrógeno (C/N) del rastrojo determina la tasa de descomposición, variable que incide en la contribución a la humificación y los posteriores niveles de materia orgánica en el suelo (Fu et al. 2021; Manso & Forján, 2016; Menéndez & Hilbert, 2013; Sarkar et al., 2020; Turmel et al., 2015). Otra alternativa para atenuar los efectos del monocultivo sojero consiste en incrementar la eficiencia de prácticas convencionales como el barbecho. En la Región Pampeana prevalecen los cultivos de verano, principalmente, la soja y el maíz (*Zea mays* L.) (Caviglia & Andrade, 2010), por lo que la mayor parte de los suelos bajo agricultura se encuentran en barbecho durante el otoño y el invierno, lo cual implica que estos pueden tener una duración de por lo menos seis meses.

La adición de materia orgánica al suelo durante ese período, en forma de estiércoles compostados u otros residuos orgánicos generados en las propias explotaciones agrícolas y/o ganaderas o en zonas urbanas, surge como una alternativa promisorio en los cultivos extensivos por su aporte de nutrientes en forma orgánica (De Battista & Arias, 2016; Lauric et al., 2010; Sarwar et al., 2007).

En los últimos años, también ha adquirido gran difusión en las rotaciones agrícolas el empleo de cultivos de cobertura (CC) para mitigar y/o revertir una serie de procesos, entre ellos los generados por el cultivo de soja, que pueden condicionar la sostenibilidad de los sistemas de producción. La inclusión de un CC de crecimiento otoño-invernal en una secuencia basada en cultivos estivales, reduce la duración del barbecho y mejora la eficiencia del uso de los recursos: nutrientes, radiación y agua, lo que se traduce en mayor aporte de carbono al suelo, con aumento de la materia orgánica y de su fracción joven (Villamil et al., 2006).

Las prácticas agronómicas también afectan el consumo y la eficiencia en el uso del agua (EUA) (Videla Menseguez et al., 2020), recurso que constituye una de las principales limitantes de la producción agrícola. La EUA varía entre especies, debido a su tipo de metabolismo C3 o C4, composición de la biomasa y a las características del uso del agua (Rattalino Edreira et al., 2018; Sadras & McDonald, 2012).

En este marco, es necesario generar información, a través de ensayos, que permita incluir a la soja en un esquema productivo más racional y, a la vez, diversifique la producción agrícola a través de la inclusión de diferentes cultivos, entre ellos avena, cebada, colza (*Brassica napus* L.), trigo, maíz, girasol (*Helianthus annuus* L.) y sorgo (*Sorghum bicolor* L. (Moench)).

Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo fue evaluar la sustentabilidad ecológica de cuatro secuencias agrícolas, bajo distintos manejos de sus barbechos.

Materiales y métodos

En la Estación Experimental Julio Hirschhorn, (34° 52' LS, 57° 58' LO), localizada en Los Hornos, partido de La Plata, perteneciente a la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata (UNLP), Provincia de Buenos Aires, Argentina, sobre un suelo Argiudol típico, se iniciaron en el año 2011, ensayos en campo. En estos ensayos se compararon distintas secuencias agrícolas (S) que se repiten cada cuatro años, S1: avena (*Avena sativa* L.) / soja de segunda (2da) (*Glycine max* L.) - maíz (*Zea mays* L.) girasol (*Helianthus annuus* L.) - trigo (*Triticum aestivum* L.), S2: cebada (*Hordeum vulgare* L.) / soja 2da - maíz - soja - trigo, S3: colza (*Brassica napus* L.) / soja 2da - maíz - sorgo (*Sorghum bicolor* L.) - trigo y S4: trigo / soja 2da - soja - soja - trigo. Se consideró soja de 2da a la implantada luego de cosechado el cultivo anterior, sin mediar un barbecho entre ellos.

A partir del periodo 2015-2016, los ensayos se manejaron con cuatro alternativas de barbechos entre la implantación de los cultivos de verano, si bien en todos se hizo un control químico de las malezas, se implementaron distintos manejos en relación con la nutrición de los cultivos: 1) barbecho químico o tradicional con aplicación de una dosis media de fertilizantes; 2) aplicación de compost; 3) inclusión de cultivo de cobertura, sin agregado de fertilizantes al cultivo sucesor (CCM) y 4) inclusión de cultivo de cobertura más el agregado de fertilizante en el cultivo sucesor (CCA).

La fertilización en el tratamiento testigo consistió en: la aplicación de 50 kg ha⁻¹ fosfato di amónico + 100 kg ha⁻¹ de urea en los cereales de invierno y la colza y de 80 kg ha⁻¹ de superfosfato triple de calcio + 100 kg ha⁻¹ de urea en el maíz.

El compost se obtuvo a partir de cama de pollo, que se tomó de un galpón dedicado a la producción de pollos reproductores y se sometió a un proceso de compostaje por seis meses. Su análisis presentó los siguientes resultados: humedad: 52 %, materia orgánica: 50 %, carbono orgánico: 27,8 %, nitrógeno total: 2,5 %, fósforo total: 1,3 %; relación carbono nitrógeno: 11, pH: 8,5, conductividad eléctrica: 16,2 dS m⁻¹. Con base en datos de Sarwar et al. (2007), según tipo de suelo en cultivos extensivos y tipo de compost se utilizó una dosis de 20 t ha⁻¹, lo que implicó 2 kg m⁻². El cultivo de cobertura (CC), consistió en una mezcla de avena y vicia (*Vicia sativa* L.) a una densidad de 50 kg ha⁻¹ de la gramínea y 20 kg ha⁻¹ de la leguminosa.

Para el CCA, la fertilización consistió en: la incorporación de 160 kg ha⁻¹ de superfosfato triple de calcio + 11 kg ha⁻¹ sulfato de amonio + 160 kg ha⁻¹ de urea en el maíz; 75 kg ha⁻¹ de superfosfato triple de calcio en la soja; 25 kg ha⁻¹ de fosfato di amónico + 56,6 kg ha⁻¹ de sulfato de amonio en el girasol; y 56,6 kg ha⁻¹ de fosfato di amónico + 119 kg ha⁻¹ de urea + 56,6 kg ha⁻¹ de sulfato de amonio en el sorgo.

El período analizado en este trabajo abarcó el segundo ciclo de las mencionadas secuencias, desde el año 2015 al 2018 inclusive, en el que se incluyeron dos veces (entre los cultivos de verano) los distintos tipos de barbechos antes citados (Cuadro 1). La siembra de los cultivos se realizó sin remoción del suelo. Para todos los cultivos se determinó la biomasa total producida y el rendimiento. Los cultivos de cobertura se sembraron el 9 de junio en el 2016 y el 2 de junio en el 2017. Su secado se realizó el 9 de octubre en el 2016, con 200 cc ha⁻¹ de dicamba + 4 L ha⁻¹ de glifosato (48 %) y el 7 de octubre en el 2017, con 3 L ha⁻¹ de glifosato (48 %). El compost se aplicó el 17 de julio en el 2016 y el 27 de julio en el 2017.

Para evaluar la sustentabilidad ecológica se emplearon cinco indicadores: cuatro relativos a la calidad del suelo: balance de nitrógeno (BN), balance de fósforo (BP), balance de azufre (BS), balance de carbono (C) por considerarse la base de la producción agrícola y uno relativo a otro recurso importante para los agroecosistemas, como es la eficiencia de uso del agua. Para el balance de nutrientes, las extracciones de nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S) se calcularon para cada cultivo al multiplicar cada porcentaje de nutriente en el grano por el rendimiento en kg ha⁻¹. La concentración de N se determinó mediante Kjeldahl. Las concentraciones de P y S se determinaron mediante espectrometría de plasma de Ar acoplado de forma inductiva (Association of Official Agricultural Chemists [AOAC], 2000). Los aportes de nutrientes a través de fertilizantes, se calcularon según la dosis aplicada y el grado técnico de cada formulación. Se estimó también un aporte de nitrógeno de la soja y de los cultivos de cobertura leguminosos, a través de la fijación simbiótica del 40 % (Ferraris & González Anta, 2014) y el aporte de nitrógeno, fósforo y azufre del compost.

El balance de carbono se calculó por diferencia entre carbono humificado a partir de los rastrojos de los cultivos y el mineralizado por el suelo. Se cuantificó la cantidad de C humificado por cada secuencia en los cuatro años, en base a los aportes de rastrojo de cada cultivo, al que se le agregó un 20 % como aporte de materia orgánica del sistema radicular en descomposición (Álvarez, 2006; Richmond & Rillo, 2009).

El C humificado se obtuvo mediante la multiplicación del aporte de C de esos rastrojos aéreos y radicales (46 %) por el coeficiente medio de humificación correspondiente a cada cultivo, obtenido de Richmond y Rillo (2009), para diferentes situaciones edafoclimáticas: 0,36 % para trigo, avena, cebada, maíz y sorgo, y 0,38 % para canola, soja y girasol.

Cuadro 1. Cultivos incluidos en cada secuencia, con sus respectivas fechas de siembra y cosecha. La Plata, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Periodo 2015-2018.

Table 1. Crops included in each sequence, with their respective planting and harvest dates. La Plata, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Period 2015-2018.

	Secuencia 1	Secuencia 2	Secuencia 3	Secuencia 4
Año 2015				
Cultivo	Avena (<i>Avena sativa</i> L.)	Cebada (<i>Hordeum vulgare</i> L.)	Colza (<i>Brassica napus</i> L.)	Trigo (<i>Triticum aestivum</i> L.)
Día de siembra	17/07/2015	17/07/2015	16/07/2015	17/07/2015
Día de cosecha	21/12/2015	18/12/2015	19/11/2015	21/12/2015
Año 2016				
Cultivo	Soja 2da*	Soja 2da*	Soja 2da*	Soja 2da*
Día de siembra	15/01/2016	15/01/2016	15/01/2016	15/01/2016
Día de cosecha	12/05/2016	12/05/2016	12/05/2016	12/05/2016
Barbechos: testigo, compost, CCM** y CCA***				
Cultivo	Maíz (<i>Zea mays</i> L.)	Maíz	Maíz	Soja (<i>Glycine max</i> L.)
Día de siembra	25/11/2016	25/11/2016	25/11/2016	04/11/2016
Día de cosecha	07/04/2017	07/04/2017	07/04/2017	31/03/2017
Año 2017				
Barbechos: testigo, compost, CCM** y CCA***				
Cultivo	Girasol (<i>Helianthus annuus</i> L.)	Soja	Sorgo (<i>Sorghum bicolor</i> L.)	Soja
Día de siembra	18/10/2017	17/11/2017	14/12/2017	17/11/2017
Día de cosecha	13/03/2018	13/04/2018	06/04/2018	13/04/2018
Año 2018				
Cultivo	Trigo	Trigo	Trigo	Trigo
Día de siembra	10/07/2018	10/07/2018	10/07/2018	10/07/2018
Día de cosecha	19/12/2018	19/12/2018	19/12/2018	19/12/2018

*Soja sembrada luego de la cosecha del cultivo antecesor, sin mediar barbecho. / * Soybeans sown after the harvest of the predecessor crop, without fallow.

**Cultivo de cobertura sin fertilización en el cultivo sucesor. / **Cover crop without fertilization in the successor crop.

***Cultivo de cobertura con fertilización en el cultivo sucesor. / ***Cover crop with fertilization in the successor crop.

Para el cálculo del C mineralizado se tomaron muestras de suelo hasta los 15 cm de profundidad (compuestas por tres submuestras para cada tratamiento), sobre las cuales se determinó MO: 2,85 % por el método Walkley-Black (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2016) y la densidad aparente: 1,18 t m⁻³. Se multiplicó el porcentaje de MO por la profundidad analizada y por la densidad para expresarlo en kg ha⁻¹. A su vez, la MO contiene el 56 % del C (Richmond & Rillo, 2009), por lo tanto, el contenido de C fue de 28 224 kg ha⁻¹. Varias investigaciones reportan entre 3 y 5 % de mineralización anual bajo sistemas de labranza cero (Richmond & Rillo, 2009). Si se considera un valor del 4 %, entonces en el presente ensayo se habrían mineralizado 1128 kg ha⁻¹ de C por año.

Los análisis se realizaron en el Laboratorio de Edafología, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata.

La eficiencia de uso del agua (EUA) se calculó como la relación entre el rendimiento de cada cultivo en las distintas secuencias y las precipitaciones ocurridas desde el secado del cultivo de cobertura y la finalización de los ciclos de cada cultivo (Micucci & Álvarez, 2004; Rattalino Edreira et al., 2018; Sadras & McDonald, 2012; Vasco Silva et al., 2020). Los datos de precipitación se obtuvieron de la Estación Meteorológica Davis de la Estación experimental.

Debido a que los indicadores se expresan en diferentes unidades, para poder establecer comparaciones fueron estandarizados. Para esto, y como el objetivo fue comparar las secuencias analizadas, para cada indicador se establecieron cinco clases y se consideró como referencia el rango de valores obtenidos en el ensayo. En todos los casos se asignó el mayor valor a la situación más deseable, es decir, un balance de nutrientes menos deficitario, un balance de carbono más alto y una mayor eficiencia de uso del agua. Para comparar las rotaciones y manejos se calculó el índice de sustentabilidad (IS) como la media ponderada de los indicadores una vez estandarizados, se consideró más importante el impacto local de las prácticas agrícolas, por lo que se ponderó con mayor peso el BN, BP, BS y balance de C, que a la EUA. La fórmula de cálculo fue la ecuación 1:

$$IS=[(BN*2) + (BP*2) + (BS*2) +(BC*2) + EUA]/9 \quad (1)$$

Donde:

IS: índice de sustentabilidad.

BN: balance de N.

BP: balance de P.

BS: balance de S.

BC: balance de C.

EUA: eficiencia de uso del agua.

2: valores de ponderación.

9: suma valores de ponderación.

Análisis estadístico

El diseño experimental fue en bloques al azar con cuatro repeticiones y parcelas divididas, donde la parcela principal correspondió a las secuencias y la subparcela al tipo de barbecho. En los casos que correspondieron, los datos se procesaron por el análisis de la varianza con la prueba de Tukey ($p<0,05$) para la separación de medias. Se comprobaron los supuestos de homogeneidad de varianzas y distribución normal de los errores. Se utilizó el software estadístico InfoStat versión 2016 (Di Rienzo, 2016).

Resultados

Los rendimientos y los indicadores presentaron diferencias estadísticamente significativas para las secuencias y los tratamientos de barbechos (Cuadro 2). El rendimiento total para los cuatro años de secuencias analizadas resultó mayor en la S1, siguiéndole en orden decreciente $S2>S3>S4$, las últimas dos sin diferencias significativas entre ellas. Con base en los distintos barbechos, los mayores rendimientos se lograron bajo CCA y CCM, y los menores en el barbecho testigo, el compost mostró un comportamiento intermedio. A su vez, con base en los indicadores de sustentabilidad por secuencia, el balance de N fue negativo para todas las secuencias, de las cuales

Cuadro 2. Rendimiento total en grano, y valores de los indicadores usados para la evaluación de sustentabilidad de cuatro rotaciones de cultivos en La Plata, Provincia de Buenos Aires, Argentina, producidas bajo cuatro manejos de sus barbechos. Período 2015-2018.

Table 2. Total yield in grain, and values of the indicators used for the sustainability evaluation of four crop rotations in La Plata, Buenos Aires province, Argentina, produced under four managements of their fallows. Period 2015-2018.

Fuente de variación	Rendimiento Total kg ha ⁻¹	Balance de N kg ha ⁻¹	Balance de P kg ha ⁻¹	Balance de S kg ha ⁻¹	Balance de C kg ha ⁻¹	EUA kg mm ⁻¹
Secuencia (S)						
S1	25 356,1 c	-292,78 a	-56,29 a	-34,54 d	1235,51 c	13,86 c
S2	22 180,23 b	-215,29 b	-36,28 b	-43,08 c	1341,46 c	10,94 b
S3	20 456,86 a	-175,12 c	-37,69 b	-81,68 a	623,38 b	10,63 b
S4	19 161,92 a	-301,51 a	-53,08 a	-56,37 b	-130,84 a	9,38 a
Barbecho (B)						
Testigo	20 620,72 a	-303,39 a	-55,10 b	-57,62 b	605,07 a	10,59 a
Compost	21 687,60 ab	-258,91 b	-43,74 c	-61,53 a	723,74 ab	11,15 ab
CCM	22 170,81 b	-260,18 b	-72,25 a	-63,35 a	902,23 b	11,41 b
CCA	22 675,98 b	-162,23 c	-12,24 d	-33,18 c	838,47 b	11,65 b
Secuencia	P=0,0001	P=0,0001	P=0,0001	P=0,0001	P=0,001	P=0,0001
Barbecho	P=0,0084	P=0,0001	P=0,0001	P=0,0001	P=0,001	P=0,0001
S × B	P=0,5031	P=0,098	P=0,112	P=0,0087	P=0,8154	P=0,4756

Para cada columna y dentro de cada factor, letras distintas implican diferencias significativas, Tukey (P<0,05). Referencias: Rotaciones: S1: avena (*Avena sativa* L.) / soja 2da (*Glicine max* L.) - maíz (*Zea mays* L.) - girasol (*Helianthus annuus* L.) - trigo (*Triticum aestivum* L.), S2: cebada (*Hordeum vulgare* L.) / soja 2da - maíz - soja - trigo, S3: colza (*Brassica napus* L.) / soja 2da - maíz - sorgo (*Sorghum bicolor* L.) - trigo y S4: trigo / soja 2da - soja - soja - trigo. EUA: eficiencia de uso del agua. CCM: cultivo de cobertura sin fertilización en el cultivo sucesor. CCA: cultivo de cobertura y fertilización en el cultivo sucesor.

For each column and within each factor, different letters imply significant differences, Tukey (P<0.05). References: Rotations: S1: oats (*Avena sativa* L.) / soybean 2nd (*Glicine max* L.) - corn (*Zea mays* L.) - sunflower (*Helianthus annuus* L.) - wheat (*Triticum aestivum* L.), S2: barley (*Hordeum vulgare* L.) / soybean 2nd - corn - soybean - wheat, S3: rapeseed (*Brassica napus* L.) / soybean 2nd - corn - sorghum (*Sorghum bicolor* L.) - wheat, and S4: wheat / soybean 2nd - soybean - soybean - wheat. EUA: water use efficiency. CCM: cover crop without fertilization in the successor crop. CCA: cover crop and fertilization in the successor crop.

las más extractivas fueron S4 y S1 y la menos negativa S3. La secuencia S2 mostró un valor intermedio. Para el balance de P, también todas las secuencias presentaron balances negativos, las más extractivas fueron S1 y S4 y las menos extractivas S2 y S3, sin diferencias estadísticamente significativas entre ellas. Para el balance de S, todas las secuencias resultaron negativas y con diferencias significativas entre sí, con el siguiente orden decreciente S3>S4>S2> S1. Para el balance de C, la única secuencia negativa fue S4, todas las demás resultaron con balances positivos, con el siguiente orden S2>S1>S3. Para la eficiencia de uso del agua (EUA), también hubo diferencias estadísticamente significativas entre secuencias, la menos eficiente fue la S4 y las más eficientes S1, y S2 y S3 con valores intermedios (Cuadro 2, Figura 1 a, b, c y d).

Con base en los indicadores de sustentabilidad y según los distintos barbechos, el balance de nutrientes resultó negativo para todos los casos analizados y con diferencias estadísticamente significativas entre los barbechos. El balance de N resultó más negativo para el testigo y menos negativo en CCA, con valores intermedios para el compost y CCM. Para el balance de P el orden decreciente de negatividad fue el siguiente: CCM>Testigo>compost >CCA. Para el balance de S, el orden decreciente de negatividad fue el siguiente: compost>CCM>testigo>CCA. (Cuadro 2, Figura 1 a, b, c y d). Tanto para el balance de C y la EUA, el testigo presentó los valores más bajos, el compost los intermedios y el CCM y CCA alcanzaron los mejores resultados (Cuadro 2, Figura 1 a, b, c y d).

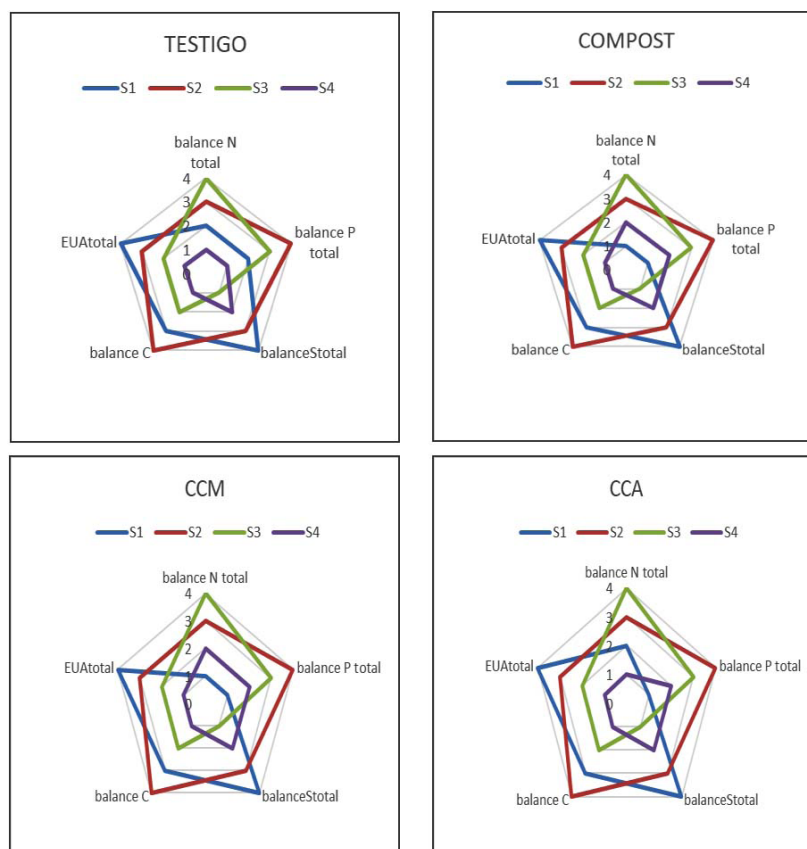


Figura 1. Representación gráfica de cinco indicadores de sustentabilidad ecológica comparativa para cuatro secuencias de cultivo producidas bajo cuatro manejos de barbechos: a) testigo, b) compost, c) CCM (cultivo de cobertura sin fertilización en el cultivo sucesor) y d) CCA (cultivo de cobertura y fertilización en el cultivo sucesor). Secuencias: S1: avena (*Avena sativa* L.) / soja 2da (*Glycine max* L.) - maíz (*Zea mays* L.) - girasol (*Helianthus annuus* L.) - trigo (*Triticum aestivum* L.), S2: cebada (*Hordeum vulgare* L.) / soja 2da - maíz - soja - trigo, S3: colza (*Brassica napus* L.) / soja 2da - maíz - sorgo (*Sorghum bicolor* L.) - trigo y S4: trigo / soja 2da - soja - soja - trigo. La Plata, Buenos Aires, Argentina. Período 2015-2018.

Figure 1. Graphic representation of five comparative ecological sustainability indicators for four crop sequences produced under four fallow management: a) Control, b) Compost, c) CCM (cover crop without fertilization in the successor crop), and CCA (cover crop and fertilization in the successor crop), respectively. Sequences: S1: oats (*Avena sativa* L.) / soybean 2nd (*Glycine max* L.) - corn (*Zea mays* L.) - sunflower (*Helianthus annuus* L.) - wheat (*Triticum aestivum* L.), S2: barley (*Hordeum vulgare* L.) / soybean 2nd - corn - soybean - wheat, S3: rapeseed (*Brassica napus* L.) / soybean 2nd - corn - sorghum (*Sorghum bicolor* L.) - wheat, and S4: wheat / soybean 2nd - soybean - soybean - wheat. La Plata, Buenos Aires, Argentina. Period 2015-2018.

A través del índice de sustentabilidad (IS) (ecuación 1), la secuencia S2 presentó los mejores índices, seguida por S1, S3 y, en último lugar, la secuencia S4. A su vez, S4 fue la que logró mayor incremento del índice de sustentabilidad con los barbechos alternativos: compost, CCM y CCA (Cuadro 3).

Cuadro 3. Índice de sustentabilidad para cuatro rotaciones de cultivos en La Plata, provincia de Buenos Aires, Argentina, producidas bajo cuatro manejos de los barbechos. Período 2015-2018.

Table 3. Sustainability index for four crop rotations in La Plata, Buenos Aires province, Argentina, produced under four fallow managements. Period 2015-2018.

Barbecho	Secuencia S1	Secuencia S2	Secuencia S3	Secuencia S4
Testigo	2,88	3,44	2,44	1,22
Compost	2,44	2,33	2,44	1,44
CCM	2,44	3,44	2,44	1,60
CCA	2,66	3,44	2,44	1,44

Referencias: Secuencias: S1: avena (*Avena sativa* L.) / soja 2da (*Glicine max* L.) - maíz (*Zea mays* L.) - girasol (*Helianthus annuus* L.) - trigo (*Triticum aestivum* L.), S2: cebada (*Hordeum vulgare* L.) / soja 2da - maíz - soja - trigo, S3: colza (*Brassica napus* L.) / soja 2da - maíz - sorgo (*Sorghum bicolor* L.) - trigo y S4: trigo / soja 2da - soja - soja - trigo. CCM (cultivo de cobertura sin fertilización en el cultivo sucesor) y CCA (cultivo de cobertura y fertilización en el cultivo sucesor). / References: Sequences: S1: oats (*Avena sativa* L.) / soybean 2nd (*Glicine max* L.) - corn (*Zea mays* L.) - sunflower (*Helianthus annuus* L.) - wheat (*Triticum aestivum* L.), S2: barley (*Hordeum vulgare* L.) / soybean 2nd - corn - soybean - wheat, S3: rapeseed (*Brassica napus* L.) / soybean 2nd - corn - sorghum (*Sorghum bicolor* L.) - wheat, and S4: wheat / soybean 2nd - soybean - soybean - wheat. CCM (cover crop without fertilization in the successor crop). and CCA (cover crop and fertilization in the successor crop).

Discusión

La secuencia S2 y luego la S1, fueron las que mayores rendimientos lograron. Si bien presentaron balances de N y P más negativos que el resto de las secuencias, debido a la gran extracción de dichos nutrientes para su producción, no resultaron las más extractivas de S y realizaron un alto aporte de C, debido a las gramíneas presentes. Las gramíneas lograron balances positivos de C entre el aportado por sus rastrojos y el mineralizado por el suelo. Ambas secuencias presentaron una mejor EUA que el resto, en particular la S1.

La secuencia S4 fue la de menor rendimiento y menor aporte de carbono, con valores negativos en el balance de C y en los balances de N y P. Ello estuvo asociado al bajo aporte de rastrojo y baja relación C/N del cultivo con mayor frecuencia en la misma (la soja). Esta oleaginosa necesita altas cantidades de N y P para la constitución de sus semillas, de ahí los balances más negativos en la S4 que en el resto de las secuencias. Estos resultados son coincidentes con los hallados por Manso y Forján (2016), en ensayos de secuencias de larga duración realizados en la Chacra Experimental Integrada Barrow, del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Argentina y por Fu et al. (2021), Menéndez y Hilbert (2013), Sarkar et al. (2020) y Turmel et al. (2015). Estos autores reportaron que la cantidad y calidad del rastrojo que regresa al suelo, está supeditada al tipo de cultivo utilizado en la secuencia y a la producción de biomasa, que está muy influenciada por los niveles de fertilización. La alta relación C/N de cultivos de cereales como el trigo, la cebada y la avena, determinan una lenta descomposición y favorecen la formación de materia orgánica en el suelo. En el caso de los cultivos oleaginosos (por ejemplo, la soja con una relación C/N de 43/1) el alto contenido de N y carbohidratos solubles en sus residuos, acelera la tasa de descomposición, lo que hace que la contribución de C al sistema sea baja. Sin embargo, los residuos de soja y girasol, por su rápida descomposición, aportan nutrientes durante las primeras etapas del siguiente cultivo (Fu et al., 2021; Menéndez & Hilbert, 2013; Sarkar et al., 2020; Turmel et al., 2015).

La rotación de cultivos con mayor presencia de gramíneas, aumentó la captura de carbono orgánico en el suelo y la productividad, por lo que la diversidad de cultivos resulta un componente clave para el desarrollo de

agroecosistemas sostenibles (Chahal et al., 2021). Sin embargo, para Australia se indicó que la retención de todos los residuos en una rotación predominante de cereales redujeron el establecimiento del cultivo sucesor y la eficacia de los herbicidas. La cantidad de residuos se redujo a niveles óptimos al incluir cultivos de leguminosas o canola en la rotación, ya que estos residuos se descomponían más rápido que los residuos de cereales (Flower et al., 2021).

En este trabajo, todas las secuencias mostraron un balance de C positivo entre el C mineralizado en el suelo y el C humificado por los cultivos, a excepción de la secuencia S4, con mayor frecuencia del cultivo soja. En la pampa argentina, la pérdida de carbono del suelo se atribuye a la gran proporción de soja en la rotación (Caride et al., 2012; Milesi Delaye et al., 2013). Al respecto, varios estudios han demostrado que el monocultivo de soja disminuye las reservas de carbono del suelo (Caride et al., 2012). El carbono orgánico del suelo está asociado con la productividad de la tierra, ya que un nivel adecuado de materia orgánica del suelo está relacionado con una mejor circulación del aire y el agua y la disponibilidad de nutrientes. Además, el secuestro de carbono contribuye a la mitigación del cambio climático (Stockmann et al., 2013).

Con base en lo hallado en el presente trabajo se refuerza el concepto de rotación de cultivos, donde los objetivos específicos de manejo del suelo (cobertura, aporte de MO y nutrientes) deben sincronizarse con los requerimientos de los cultivos, lo que coincide con los trabajos realizados por Manso y Forján (2016), en el sudeste de la provincia de Buenos Aires y para distintas secuencias agrícolas.

La secuencia S3, si bien tuvo rendimientos más bajos que las secuencias S1 y S2, presentó los balances de N y P menos negativos. Su balance negativo en S estuvo asociado a la colza, de alta extracción de dicho elemento (Ma et al., 2019). Sus balances de C y EUA resultaron con valores intermedios en comparación con el resto de las secuencias.

Lo precedente fue corroborado por el índice de sustentabilidad (IS), que mostró a la secuencia S2 como de mayor sustentabilidad. Asociado a un mejor uso del agua y el aporte de materia orgánica al suelo. Esto se registró también en los cultivos que la componen, incluidos la soja 2da, el maíz y el trigo, lo que indica una ventaja en el diseño de la rotación, relacionada con el efecto antecesor. A su vez, la secuencia menos sustentable para los cuatro manejos resultó la S4, debido a su baja EUA, alta extracción de nutrientes, bajo aporte de C, rápida descomposición y menor rendimiento en granos.

Entre los manejos del barbecho, los manejos alternativos con CCA y CCM mejoraron la mayoría de los indicadores analizados, respecto al barbecho testigo. En concordancia con estos resultados, en experimentos de largo plazo conducidos en Córdoba (Basanta et al., 2016), Santa Fé y Buenos Aires (Martínez et al., 2013), se observó que la inclusión de una gramínea como cultivo de cobertura (CC) en un sistema de monocultivo de soja, mejora significativamente los aportes de residuos vegetales y los niveles de carbono orgánico del suelo.

A través de la degradación de los tejidos del CC se reciclan nutrientes en el sistema y, a diferentes tasas, estos son liberados al suelo y quedan disponibles para el cultivo siguiente. En Argentina, varios investigadores han estudiado la tasa de descomposición de los residuos de distintos CC y la liberación de C, N y P (Fernández et al., 2012; Restovich & Andriulo, 2013). Es importante su función en la retención del nitrógeno mineral con la consecuente disminución de las pérdidas por lixiviación. En un estudio de cuatro años, Restovich y Andriulo (2013) observaron una reducción de por lo menos el 50 % del N mineral en el suelo luego de un CC con relación al barbecho. Los cultivos de cobertura disminuyen la cantidad de nitratos residuales, susceptibles de ser lixiviados, durante los barbechos. En el presente ensayo, esto se evidenció para la secuencia S4, con mayor frecuencia de cultivo soja, con elevados requerimientos de N, P, y S para la producción de sus semillas proteicas y con un aporte de rastrojo de bajo volumen y relación C/N, donde los barbechos alternativos mejoraron todos los indicadores de sustentabilidad (Manso & Forján, 2016).

En el caso del compost, se observó un efecto positivo sobre el balance de P, lo que coincide con lo hallado por Lauric et al. (2010) al evaluar el efecto de una fertilización orgánica con guano de pollo (1,86 % fósforo total), sobre el rendimiento del cultivo de trigo y la fertilidad del suelo. En el trabajo con diferentes dosis de cama de pollo y aplicación de fosfato di-amónico, De Battista y Arias (2016) hallaron una mayor concentración de P en el suelo

cuando se aplicó fertilizante orgánico versus fertilizante de síntesis química. Encontraron, también en este caso, un aporte al suelo equivalente a 250 kg ha⁻¹ de nitrógeno total.

En las S1, S2 y S3, el efecto de los distintos barbechos sobre la sustentabilidad ecológica fue relativo, en la S4 fue más marcado, y mostró la importancia de estas prácticas alternativas, en particular en sistemas productivos con baja biodiversidad. La inclusión de los CC de por sí incrementa la biodiversidad del sistema, al incluir diferentes especies vegetales, pero el aporte de compost favorece el aumento de la biodiversidad a nivel del suelo. Este aspecto es de gran importancia, ya que la biodiversidad ha sido reconocida como esencial para la agricultura y base de la sustentabilidad de los agroecosistemas. En este punto es importante tener en cuenta que los efectos derivados de una mayor biodiversidad se acumulan en el tiempo a través de la provisión de servicios ecosistémicos, por lo cual sería necesario monitorear en un plazo más largo las ventajas de estos barbechos alternativos sobre la sustentabilidad ecológica de estas secuencias de cultivos.

El empleo de CC y de residuos orgánicos compostados en un modelo de agricultura sostenible, se hace cada vez más necesario, ya que este sistema englobaría y daría una solución integrada a distintas problemáticas, tales como la disminución de la fertilidad de los suelos, el efecto de su degradación y contaminación por una mala praxis agrícola, debido a un empleo excesivo de agroquímicos y productos fitosanitarios, entre otros problemas. Frente al incremento en la producción de residuos orgánicos en la sociedad como consecuencia de la actividad económica, su aplicación en la agricultura podría ser una de las principales alternativas de solución conjunta para la problemática de la disminución de la materia orgánica de los suelos y del tratamiento y gestión eficaz de los residuos.

Conclusiones

Las secuencias analizadas presentaron diferencias en la sustentabilidad ecológica, lo que indica la importancia de la elección de sus componentes en la búsqueda de mejorar la sustentabilidad de los agroecosistemas.

La utilización de cultivos de cobertura en los barbechos mejoró la sustentabilidad, tanto cuando se asoció a un mayor uso de fertilizantes como cuando no se utilizaron. El uso de compost tendría un efecto inmediato menor, ya que solo en la secuencia con mayor frecuencia de soja produjo mejoras en la sustentabilidad. Se considera importante continuar la evaluación de estos barbechos alternativos en un plazo más largo.

Referencias

- Álvarez, R. (2006). Balance de carbono en los suelos. *Información Técnica de Trigo*, 105, 36–43.
- Álvarez, R., Berhongaray, G., De Paepe, J., Mendoza, M.R., Steinbach, H., Caride, C., Cantet, R., & Álvarez, C. (2015). Sojización y productividad de los suelos pampeanos. *Ciencia Hoy*, 24(142), 35–41.
- Andrade, F., Taboada, M., Lema, D., Maceira, N., Echeverría, H., Posse, G., Prieto, G., D., Sánchez, E., Ducasse, D., Bogliani, M., Gamundi, J. C., Frana, J., Trumper, E., Fava, F., Perotti, E., & Mastrángelo, M. (2017). *Los desafíos de la agricultura argentina: satisfacer las futuras demandas y reducir el impacto ambiental*. Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Association of Official Agricultural Chemists. (2000). *Official methods of analysis of AOAC Int.* (17th ed.). Association of Official Agricultural Chemists International.
- Basanta, M., Perrone, J., & Giordano, E. (2016). Evaluación de especies de cultivos de cobertura en INTA Rafaela. *Información Técnica de Trigo y Otros Cultivos de Invierno*, 131, 75–82.

- Caride, C., Piñeiro, G., & Paruelo, J. M. (2012). How does agricultural management modify ecosystem services in the Argentine Pampas? The effects on soil C dynamics. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 154, 23–33. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.05.031>
- Caviglia, O. P., & Andrade, F. H. (2010). Sustainable intensification of agriculture in the Argentinean Pampas. Capture and use efficiency of environmental resources. *The Americas Journal of Plant Science and Biotechnology*, 3(1), 1–8.
- Chahal, I., Hooker, D. C., Deen, B., Janovicek, K., & Van Eerd, L. L. (2021). Long-term effects of crop rotation, tillage, and fertilizer nitrogen on soil health indicators and crop productivity in a temperate climate. *Soil and Tillage Research*, 213, Article 105121. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105121>
- Cruzate, G. A., & Casas, R. R. (2017). Balance de nutrientes en los suelos agrícolas de Argentina en la campaña 2015/16. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 28, 14–23.
- De Battista, J. J., & Arias, N. (2016). Utilización de la cama de pollo como fertilizante en cultivos anuales, en suelos Vertisoles de Entre Ríos. En J. M. Gange (Ed.), *Cama de pollo en Entre Ríos: Aportes para su uso y manejo* (pp. 70–75). Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2016). *InfoStat versión 2016*. Universidad Nacional de Córdoba. <http://www.infostat.com.ar>
- Fernández, R., Quiroga, A., & Noellemeyer, E. (2012). Cultivos de cobertura, ¿una alternativa viable para la región semiárida pampeana? *Ciencia del Suelo*, 30, 137–150.
- Ferraris, G. N., & González Anta, G. (2014). *Contribución del Nitrógeno Inorgánico y de la FBN a la Nutrición nitrogenada de Soja en Argentina*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. <https://bit.ly/38i7ECK>
- Flower, K. C., Ward, P. R., Micin, S. F., & Cordingley, N. (2021). Crop rotation can be used to manipulate residue levels under no-tillage in a rainfed Mediterranean-type environment. *Soil and Tillage Research*, 212, Article 105062. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105062>
- Fu, B., Chen, L., Huang, H., Qu, P., & Wei, Z. (2021). Impacts of crop residues on soil health: A review. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 33(1), 164–173. <https://doi.org/10.1080/26395940.2021.1948354>
- Lauric, A., Marinissen, A., & Loewy, T. (2010). *Fertilización orgánica con guano de pollo sobre el rendimiento del cultivo de trigo y la fertilidad del suelo (Campaña 2009-2010)*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. <https://bit.ly/39gcmkZ>
- Ma, B. L., Zheng, Z., Whalen, J. K., Caldwell, C., Vanasse, A., Pageau, D., Scott, P., Earl, H., & Smith D. (2019). Uptake and nutrient balance of nitrogen, sulfur, and boron for optimal canola production in eastern Canada. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 182, 252–264. <https://doi.org/10.1002/jpln.201700615>
- Manso, L., & Forján, H. J. (2016). La materia orgánica del suelo. En H. Forján, & L. Manso (Eds.), *Rotaciones y secuencias de cultivos en la región mixta cerealera del centro sur bonaerense. 30 años de experiencias* (pp. 41–47). Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Martínez, J. P., Barbieri, P. A., Sainz Rozas, H. R., & Echeverría, H. E. (2013). Inclusion of cover crops in cropping sequences with soybean predominance in the Southeast of the Humid Argentine Pampa. *The Open Agriculture Journal*, 7, 3-10.
- Menéndez, J. E., & Hilbert, J. A. (2013). *Cuantificación y uso de biomasa de residuos de cultivos en Argentina para bioenergía*. Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

- Mengo, R. (2008). *República Argentina: Impacto social, ambiental y productivo de la expansión sojera*. Ecoportal. <https://bit.ly/3Mro4aH>
- Micucci, F., & Álvarez, C. (2004). El agua en los cultivos extensivos III: Impacto de las prácticas de manejo sobre la eficiencia de uso del agua. *Archivo Agronómico*, 8, 1–4.
- Milesi Delaye, L. A., Irizar, A. B., Andriulo, A. E., & Mary, B. (2013). Effect of continuous agriculture of grassland soils of the Argentine Rolling Pampa on soil organic carbon and nitrogen. *Applied and Environmental Soil Science*, 2013, Article 487865. <https://doi.org/10.1155/2013/487865>
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. (2016). *Norma IRAM- SAGyP 29571-3: Calidad ambiental - Calidad del suelo. Determinación de materia orgánica en suelos. Parte 3 - Determinación de carbono orgánico oxidable por mezcla oxidante fuerte, microescala*. <https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/samla/normas/>
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. (2021). *Tablero de cultivos*. Estimaciones Agrícolas. <https://bit.ly/3phDMLS>
- Rattalino Edreira, J. I. R., Guilpart, N., Sadras, V., Cassman, K. G., van Ittersum, M. K., Schils, R. L., & Grassini, P. (2018). Water productivity of rainfed maize and wheat: a local to global perspective. *Agricultural and Forest Meteorology*, 259, 364–373. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.05.019>
- Restovich, S., & Andriulo, A. (2013). Cultivos de cobertura en la rotación soja-maíz: biomasa aérea, captura de nitrógeno, consumo de agua y efecto sobre el rendimiento en grano. En C. Álvarez, A. Quiroga, D. Santos, & M. Bodrero (Eds.), *Contribuciones de los cultivos de cobertura a la sostenibilidad de los sistemas de producción* (pp. 29–35). Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Richmond, P. F., & Rillo, S. N. (2009). Caracterización de la dinámica de incorporación de residuos de cosecha al suelo en un sistema agrícola en siembra directa en el centro-oeste de Buenos Aires. *Informaciones Agronómicas*, 43, 22–26.
- Sadras, V. O., & McDonald, G. (2012). *Water use efficiency of grain crops in Australia: Principles, benchmarks and management*. Grains Research and Development Corporation, South Australian Research and Development Institute, & University of Adelaide.
- Sainz Rozas, H. R., Echeverría, H. E. & Angelini, H. (2011). Niveles de materia orgánica y pH en suelos agrícolas de la Región Pampeana y Extra pampeana Argentina. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 2, 6–12.
- Sarandón, S. J., & Flores, C. (2014). La agroecología: el enfoque necesario para una agricultura sustentable. En S. Sarandón, & C. Flores (Eds.), *Agroecología: bases teóricas para el diseño y manejo de agroecosistemas sustentables* (pp. 42–69). Editorial de la Universidad de La Plata. <https://doi.org/10.35537/10915/37280>
- Sarkar, S., Skalicky, M., Hossain, A., Brestic, M., Saha, S., Garai, S., Ray, K., & Brahmachari, K. (2020). Management of crop residues for improving input use efficiency and agricultural sustainability. *Sustainability*, 12(23), Article 9808. <https://doi.org/10.3390/su12239808>
- Sarwar, G., Hussain, N., Schmeisky, H., & Muhammad, S. (2007). Use of compost an environment friendly technology for enhancing rice-wheat production in Pakistan. *Pakistan Journal of Botany*, 39(5), 1553–1558.
- Stockmann, U., Adams, A. A., Crawford, J. W., Field, D. J., Henakaarchchi, N., Jenkins, M., Minasny, B., McBratney, A. B., de Remy de Courcelles, V., Singh, K., Wheeler, I., Abbott, L., Angers, D., A. Baldock, J., Bird, M. I., Brookes, P. C., Chenu, C., Jastrow, J. D., Lal, R., ... Zimmermann, M. (2013). The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 164, 80–99. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.10.001>

- Turmel, M. S., Speratti, A., Baudron, F., Verhulst, N., & Govaerts, B. (2015). Crop residue management and soil health: A systems analysis. *Agricultural Systems*, 134, 6–16. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.05.009>
- Vasco Silva, J. V., Tenreiro, T. R., Spätjens, L., Anten, N. P. R., van Ittersum, M. K., & Reidsma, P. (2020). Can big data explain yield variability and water productivity in intensive cropping systems? *Field Crops Research*, 255, Article 107828. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107828>
- Videla Mensegue, H. R., Degioanni, A., & Bonadeo, E. (2020). Productividad del agua de secuencias de cultivos agrícolas en la región central de Argentina. En Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (Ed.), *Actas XXVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo: Desafíos para una producción y desarrollo sustentables* (p. 1025). Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. http://www.suelos.org.ar/sitio/wp-content/uploads/2021/02/CACS_2020.pdf
- Villamil, M. B., Bollero, G. A., Darmody, R. G., Simmons, F. W., & Bullock, D. G. (2006). No-Till corn/soybean systems including winter cover crops: Effects on soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 70(6), 1936–1944. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0350>