

## **Variación espacio temporal del *stock* de carbono orgánico y su relación con los cambios en el uso del suelo. Partido de Tandil, Región Pampeana Austral, Argentina**

Spatio-temporal variation of the organic carbon stock and its relationship with changes in land use. Tandil department, Austral Pampean Region, Argentina

Variação espaço-temporal do estoque de carbono orgânico e sua relação com mudanças no uso da terra. Distrito de Tandil, Região Austral Pampeana, Argentina

*Ailín Somoza*<sup>1</sup>

*Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.*

*Patricia Vazquez*<sup>2</sup>

*Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.*

- 
- 1 Licenciada en diagnóstico y Gestión Ambiental. Centro de Estudios Sociales de América Latina (CESAL). UNICEN (Tandil, Argentina). CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas). Dirección de correo electrónico: [somoza.ailin@gmail.com](mailto:somoza.ailin@gmail.com),  <https://orcid.org/0000-0002-9176-3112>
  - 2 Doctora en Ciencias Agrarias. Centro de Estudios Sociales de América Latina (CESAL). UNICEN (Tandil, Argentina). CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas). Dirección de correo electrónico: [patriciavazquez@conicet.gov.ar](mailto:patriciavazquez@conicet.gov.ar),  <https://orcid.org/0000-0002-4209-4901>.

## Resumen

Las transformaciones en el uso del suelo resultan propulsoras del cambio global e impactos ambientales asociados a la provisión de servicios ecosistémicos vinculados al recurso edáfico. El cambio de uso de la tierra afecta fuertemente el *stock* de carbono orgánico del suelo, fuerza fundamental para la calidad y los servicios del suelo. El objetivo del presente trabajo ha sido estimar la variación en el *stock* de carbono orgánico del suelo asociada a las tendencias del proceso de agriculturización en las Unidades Ambientales del partido de Tandil en los períodos 1989-2004 y 2004-2019. Se determinó en cada Unidad Ambiental el *stock* de carbono orgánico del suelo mediante el empleo el método del IPCC. Los datos resultantes junto con la variación de la superficie agrícola en los períodos analizados permitieron determinar el efecto de las transformaciones en el uso de la tierra en cada paisaje. Se evidenció que la agriculturización resulta un motor clave en el deterioro de la capacidad del suelo para mantener la provisión de servicios ecosistémicos asociados.

**Palabras claves:** agriculturización, pastizales y pasturas, servicios ecosistémicos, agricultura sustentable.

## Abstract

Transformations in land use are drivers of Global Change and environmental impacts associated with the provision of ecosystem services linked to the edaphic resource. The change in land use strongly affects the soil organic carbon stock, a fundamental force for soil quality and services. The objective of this work has been to estimate the variation in the soil organic carbon stock associated with the trends of the agriculturization process in the Environmental Units of the Tandil department in the period 1989 - 2004 - 2019. It was determined, in each Unit, the soil organic carbon stock using the IPCC method. The resulting data with the variation of the agricultural area in the analyzed period allowed to determine the effect of the transformations in the use of the land in each landscape. It is evidenced that agriculturization is a key driver in the deterioration of the soil's capacity to maintain the provision of associated ecosystem services.

**Keywords:** agriculturization, grasslands and pastures, ecosystem services, sustainable agriculture.

## Resumo

As mudanças no uso da terra são impulsionadoras das mudanças globais e dos impactos ambientais associados à prestação de serviços ecosistémicos ligados aos recursos do solo. A mudança no uso da terra afeta fortemente o estoque de carbono orgânico no solo, uma força fundamental para a qualidade e serviços do solo. O objetivo deste trabalho é estimar a variação do estoque de carbono orgânico do solo associado às tendências do processo de agricultura nas Unidades Ambientais do distrito de Tandil nos períodos 1989-2004 e 2004-2019. O estoque de carbono orgânico do solo foi determinado em cada Unidade Ambiental pelo método do IPCC. Os dados resultantes juntamente com a variação da superfície agrícola nos períodos analisados permitiram determinar o efeito das transformações no uso da terra em cada paisagem. É evidente que a agricultura é um fator chave na deterioração da capacidade do solo de manter a provisão de serviços ecosistémicos associados.

**Palavras-chave:** Agriculturização; Agricultura sustentável; Campos e pastagens; Serviços ecosistémicos.

## Introducción

La expansión de la superficie cultivada hasta mediados del siglo XX y el aumento de los rendimientos por unidad de superficie, que estuvieron basados en el uso de insumos externos, dieron lugar a notables incrementos de la producción global. Este contexto ha dado lugar a un escenario de cambios en los usos del suelo, a un campo con predominio de la agricultura desplazamiento de la ganadería y otros rubros agropecuarios (Maceira *et al.*, 2020) y a profundos impactos ambientales sin precedentes de índole ecológicos, económicos y sociales (Iermanó y Sarandón, 2016; Andrade *et al.*, 2017; Sarandón, 2020).

El sector agroindustrial argentino, particularmente el de la Región Pampeana, ha sido pionero en la adopción. innovación tecnológica y organizacional de los modelos derivados del agronegocio (Andrade *et al.*, 2017). Dada su extensión y productividad, dicha agroindustria es considerada una de las principales áreas agrícolas del mundo (Satorre y Slafer, 1999). En ella, los cambios en el uso del suelo y la consecuente alteración de la cobertura vegetal se encuentran asociados a características singulares de los modelos tecnológicos implementados que han respondido a procesos económicos y financieros que orientaron el sistema agropecuario argentino hacia un proceso de agriculturización (PA) (Pengue y Rodríguez, 2018). Dicho proceso significó, durante las últimas décadas, la conversión de tierras para cultivo junto con la intensificación gradual de la agricultura en tierras ya cultivadas que han determinado un incremento de la producción (Viglizzo *et al.*, 2011).

El aumento histórico y continuo de la producción agrícola en todo el mundo ha tenido un impacto profundo en los ciclos globales del carbono, el agua y los nutrientes (Johnson *et al.*, 2014). El suelo es un claro ejemplo de cómo las formas de producción actuales erosionan los recursos naturales y, por consiguiente, amenazan la oferta e interrelación de las funciones y servicios ecosistémicos (SE) relacionados con ellos (Pereira *et al.*, 2018). Si bien los océanos constituyen el reservorio principal del ciclo natural del C (carbono) (93%), los suelos le siguen en orden de importancia y son el principal reservorio terrestre (4%) Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), 2019). Mantener el carbono en los suelos significa sostener sus propiedades físicas y los SE relacionados como una mejor infiltración y capacidad de retención de agua, así como

un aumento potencial de la productividad agrícola y resiliencia ecológica (Zomer *et al.*, 2017). Este servicio resulta de interés puesto que es la base de temáticas asociadas con la seguridad alimentaria, la mitigación y la adaptación al cambio climático (Pries *et al.*, 2017; IPCC, 2021).

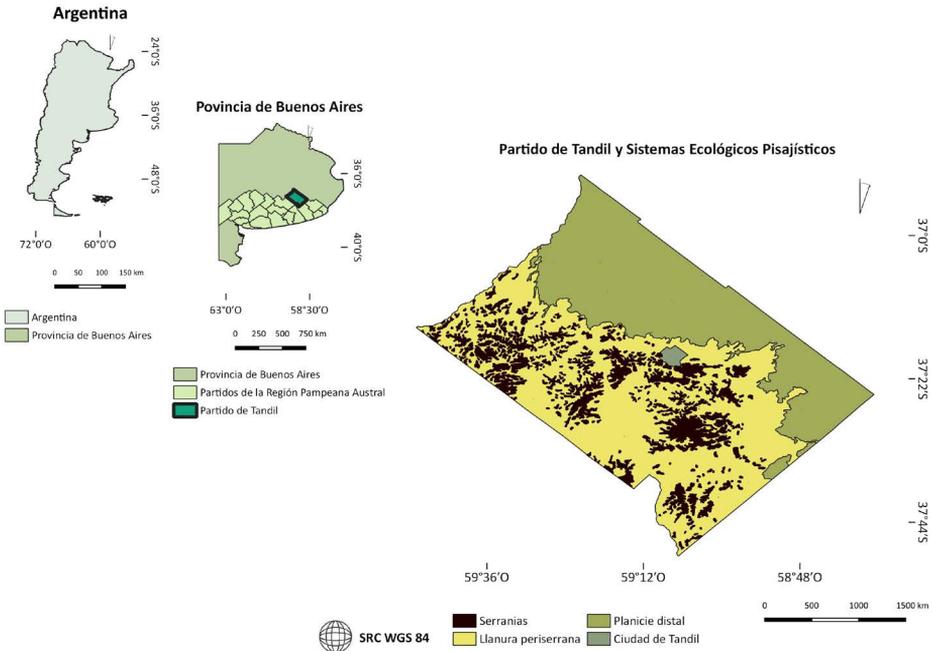
Uno de los mayores desafíos para la región es implementar un desarrollo agropecuario sostenible que permita el crecimiento económico del sector, mantenga las cualidades del ambiente y reduzca el riesgo asociado a las variaciones del clima (Papagno y Vitale, 2019). Debido a la importancia que tienen los suelos en el ciclo del C, representan tanto una amenaza como una oportunidad en lo que respecta al cambio climático (Powlson *et al.*, 2011). La amenaza se debe a su potencialidad para liberar grandes cantidades de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, principalmente, por la conversión de bosques y pastizales a tierras de cultivo, los cuales representa hasta el 24% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI), mientras que la oportunidad se debe a su capacidad de secuestrar CO<sub>2</sub> (Stockman *et al.*, 2013). A su vez, el *stock* de carbono orgánico del suelo (COS) es el principal componente que determina la calidad y la salud del suelo (Powlson *et al.*, 2011). Por lo tanto, conocer los contenidos de COS bajo distintos escenarios de uso del suelo es una necesidad fundamental para el desarrollo de estrategias que contribuyan a la mitigación del cambio climático y prácticas de manejo para un uso sustentable del suelo. Sin embargo, las técnicas disponibles para cuantificar el COS a escala regional aún se encuentran poco desarrolladas, tienen grandes niveles de incertidumbre y, cuando incluyen mediciones directas, son muy costosas (Stockmann *et al.*, 2013).

Existe una gran incertidumbre acerca de las proyecciones del futuro almacenamiento de carbono orgánico del suelo (COS) asociadas a las variaciones en las prácticas agronómicas y el clima. La evaluación de la sustentabilidad en el medio rural adquiere un reconocimiento cada vez mayor como una herramienta importante con enfoque sistémico para avanzar hacia los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Por ello, surge como objetivo del presente trabajo estimar la variación en el *stock* de COS en diferentes escenarios productivos de las Unidades ambientales (UA) del partido de Tandil, correspondiente a la Región Pampeana Austral (RPA), en los períodos 1989-2004 y 2004-2019.

### Área de estudio

El partido de Tandil (latitud: 37° 13' 25" Sur; longitud 59° 34' 33.2" Oeste), localizado en el sector sudeste de la provincia de Buenos Aires, ocupa una superficie de 4935 km<sup>2</sup>, se encuentra situado dentro de la mencionada Región Pampeana que puede ser dividida en cinco subregiones homogéneas si se considera la calidad de sus suelos y las precipitaciones: Pampa ondulada, Pampa central, Pampa austral, Pampa deprimida o inundable y Pampa mesopotámica. Particularmente, el área de estudio pertenece a la denominada RPA caracterizada como una pradera llana con suave declive hacia el mar que posee suelos fértiles y cordones serranos; a los sistemas de Tandilia y Ventania, que albergan una amplia diversidad de especies y ofrecen un fuerte potencial productivo, ambiental y turístico (ver Figura 1).

**Figura 1.** Localización del partido de Tandil en la Región Pampeana Austral.

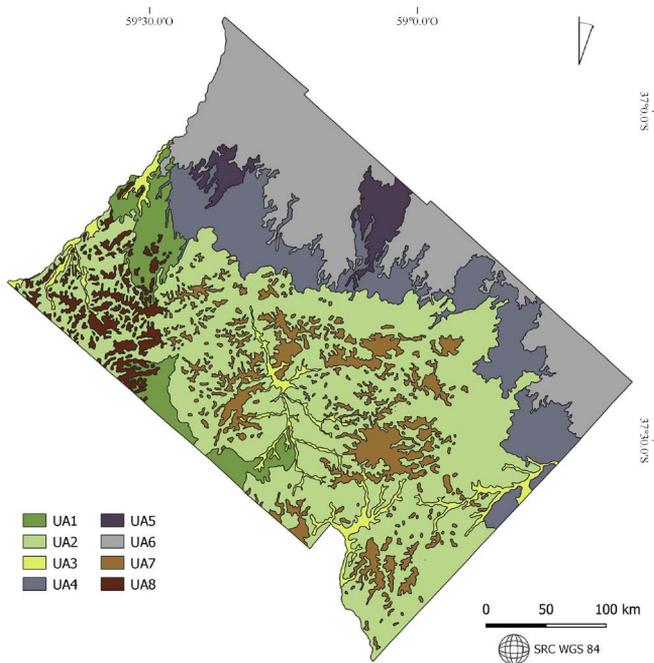


Fuente: Elaboración propia.

### Caracterización de las Unidades Ambientales del partido de Tandil

Al interior del Partido se identifican tres Sistemas Ecológico Paisajísticos (SEP) caracterizados por su estructura ecológica, sus aspectos ecodinámicos y sus características diferenciales: Serranías (S), Llanura periserrana (LLP) y Planicie distal (PD) (Sánchez y Zulaica, 2002) (ver Figura 1). A su vez, dentro de los SEP del partido de Tandil, fueron caracterizadas ocho UA que definen, a lo largo del tiempo, la relación sociedad-naturaleza evidenciada en cada una de ellas convirtiéndose entonces en pilares para el ordenamiento ambiental del territorio (ver Figura 2 y Tabla 1). Dichas unidades integran aspectos ecológicos que destacan: (a) en lo físico, el clima, suelo y geomorfología; (b) en lo biológico, las condiciones de la vegetación; en lo productivo, combinación similar de limitaciones y potencialidades para el uso de las tierras; y aspectos asociados a la dinámica e intensidad de los procesos de transformaciones de usos del suelo imperantes en cada una.

**Figura 2.** Unidades Ambientales.



Fuente: Somoza y Vazquez, 2022.

**Tabla 1.** Principales características de las Unidades Ambientales.

S E P**	UAE*						UAG 1*	UAG 2*	UA*
	Geoforma del paisaje	Descripción morfoedáfica	Suelo dominante	IP*	CU*				
LLP1 LLP2 LLP3 LLP4 LLP5 LLP6	Paisajes de lomas extendidas	Llanura ligera a muy ligeramente ondulada conformando una matriz espacial en la que difunden pequeñas depresiones	<i>Argiudol petro-cálcico</i>	59,9	III	A	M	UA1 - Paisajes de lomas extendidas que presentan un PA de intensidad descendente	
		Llanura ligeramente ondulada conformando una matriz espacial con lomas sobrepuestas, que a veces presentan crestas rocosas		60,2		A			
	Paisaje serrano ondulado con pendientes suaves, medias y largas	Llanura ondulada conformando una matriz espacial con abundantes lomas sobrepuestas	<i>Argiudol típico</i>	68,2		A	M	UA2 - Paisaje serrano ondulado con pendientes suaves, medias y largas que presentan un PA de intensidad continua o descendente	
		Llanura ondulada conformando una matriz espacial con abundantes lomas sobrepuestas		65,1		M	M		
	Paisajes suavemente ondulados que asocian áreas deprimidas.	Llanura ondulada conformando una matriz espacial con abundantes lomas sobrepuestas que presentan formaciones superficiales profundas	Complejo de suelos	79,2		M	B	UA3 - Paisajes suavemente ondulados que asocian áreas deprimidas que presentan un PA continua	
		Llanuras aluviales. Asocia complejos de suelos indiferenciados		33,6		M	M		

S E P*	UAE*						UAG 1*	UAG 2*	UA*
	U A E	Geoforma del paisaje	Descripción morfoedáfica	Suelo dominante	IP*	CU*			
SISTEMA ECOLOGICO PAISAJISTICO PLANICIES DISTALES	PD1a	Planicies muy suavemente inclinadas que conforman una matriz espacial asociada	a microdepressiones, a veces integradas a vías de escurrimiento	<i>Argiudol tipico</i>	74,3	III	M	A	UA4 - Planicies muy suavemente inclinadas que conforman una matriz espacial asociada que presentan un PA de intensidad ascendente
	PD1b		a vías de drenaje y lomas algo pronunciadas		83,7	II	M	A	
	PD2	Planicies de lomas planas		<i>Argiudol tipico</i>	81,3	II	B	M	UA5 - Planicies de lomas planas que presentan un PA de intensidad ascendente
	PD3a		Abundantes	<i>Argiudol tipico</i>	57,5	II	B	A	UA6 - Planicies que conforman una matriz espacial con lomas sobreimpuestas que presentan un PA intensidad ascendente
	PD3b	Planicies que conforman una matriz espacial con lomas sobreimpuestas	Ocasionales	<i>Natruodol tipico</i>	45,1	IV	B	MA	

S E P**	UAE*						UAG 1*	UAG 2*	UA*
	Geoforma del paisaje	Descripción morfoedáfica	Suelo dominante	IP*	CU*	UAG 2*			
UA7	Formaciones serranas	Abundantes afloramientos rocosos. Cuerpos edáficos poco evolucionados y de escasa profundización debido a la existencia de contactos líticos	<i>Hapludol lítico</i>	30,8	VI	MA	MA	UA7 - Formaciones serranas con abundantes afloramientos rocosos que presentan un PA de intensidad ascendente	
UA8	Formaciones serranas	Lomas moderadamente onduladas, pronunciadas, escasos afloramientos rocosos. Cuerpos edáficos más o menos desarrollados, algunas veces profundos y más frecuentemente de escasa profundidad debido a la existencia de contactos líticos	<i>Argiudol petro-cálcico</i>	42,0	IV	MA	B	UA8 - Formaciones serranas con lomas moderadamente onduladas, pronunciadas, escasos afloramientos rocosos que presentan un PA de intensidad descendente	

\*Notas: SEP: Sistema ecológico – paisajístico; UAE: Unidad agroecológica; UAG1: Unidad de agricultura período 1989 – 2004; UAG2: Unidad de agricultura período 2004 – 2019; UA: Unidad ambiental; IP: índice de productividad; CU: capacidad de uso; PA: proceso de agricultura; B: PA nulo o bajo; M: PA medio; A: PA alto; MA: PA muy alto.

Fuente: Somoza y Vázquez, 2022.

### *Modificaciones en los usos del suelo: agriculturización*

Algunos estudios anteriores constatan cambios sustanciales en el uso del suelo en áreas correspondientes a la RPA (Vazquez *et al.*, 2012a, b; 2016; 2017; 2019a, b, c; 2020; Sequeira *et al.*, 2021; Somoza *et al.* 2020; 2021), como también a nivel de establecimiento rural (Somoza *et al.*, 2019), de los cuales ha sido la transformación más destacable el avance de las áreas agrícolas hacia superficies de pastizales naturales y pasturas artificiales asociadas a modificaciones en las técnicas productivas impulsadas, singularmente, por determinados cultivos como la soja y cebada.

En el Partido, las UA correspondientes a la Llanura periserrana han sido el escenario donde las mutaciones descritas fueron radicales. De hecho, más del 75% de su superficie total de este SEP ha sido convertido de áreas de uso ganadero a agrícola entre 1989 y 2019. Por otro lado, en las UA de las Planicies distales, la actividad ganadera, representada por áreas de pastizales naturales y pasturas artificiales aún persiste, no sólo intensivamente en sistemas de engorde a corral. No obstante, cabe mencionar que en muchos sectores dicha actividad ha sido confinada a zonas con mayores riesgos productivos y económicos debido a las limitaciones en las condiciones de drenaje. En las Serranías, las mayores presiones a la transformación productiva se encuentran en las áreas colindantes con la Llanura periserrana. Perduran allí, en los sectores más elevados de dicho sistema y de roquedales las áreas de pastizales naturales.

## **Marco teórico-conceptual**

### ***Cambio climático, agriculturización y rol del carbono orgánico del suelo***

En los últimos años, la agenda internacional ha sido testiga de un incremento en la cantidad y profundidad de los debates relativos a la relación entre agricultura y cambio climático, lo cual, también se observa en las agendas de investigación respectivas (Newell, 2012). En este sentido, diversos informes del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) afirman que los impactos negativos del cambio climático sobre la producción agropecuaria, superan a aquellos que podrían ser considerados como positivos (IPCC, 2014).

La conversión de tierras y la incorporación de tecnología (principalmente insumos) durante el último siglo han afectado decisivamente la estructura y la funcionalidad de los ecosistemas. Sus impactos han sido significativos sobre funciones ecológicas esenciales como el flujo de energía, la relación *stock*-flujo de carbono, el ciclado de nutrientes, el proceso hidrológico y el patrón ecotoxicológico regional (Modernel *et al.*, 2016). En consecuencia, clima, uso de la tierra y tecnología son tres factores directos de control que influyen sobre la relación economía-ecología y, por ende, sobre la oferta de SE.

El ciclo natural del carbono juega un rol esencial en la definición del clima futuro, ya sea determinando los niveles de CO<sub>2</sub> atmosféricos en respuesta a las emisiones antropogénicas o por su contribución en la limitación de emisiones, requerida para alcanzar la estabilización buscada de CO<sub>2</sub>. Además del SE de regulación climática, el COS es primordial en la definición de otros SE tales como la retención de agua, la regulación hídrica, la protección contra la erosión, la provisión de nutrientes para los vegetales y el procesamiento de sustancias tóxicas (Powlson *et al.*, 2011). En los sistemas agrícolas, el aumento de los niveles del COS genera situaciones de beneficios múltiples, debido a que al mismo tiempo que se reducen los niveles de CO<sub>2</sub> atmosférico se mejoran la fertilidad, la productividad, la resistencia y la resiliencia del recurso suelo (Lal, 2004). Es innegable que el almacenaje de C orgánico del suelo (COS) posiblemente será el aspecto más importante del ciclo global de C en las próximas décadas (Zomer *et al.*, 2017). Tanto la provisión de sus SE asociados como su captura dependen de las características y actividades de las sociedades y en particular, de sus actores sociales.

### Marco metodológico

Para el logro del objetivo previsto, se asumieron las directrices del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, el cual describe metodologías para estimar emisiones/secuestro de CO<sub>2</sub> para realizar los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero (IPCC, 2006; 2021). Puntualmente, en el Volumen 4: “Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra”, describe un método de inventario de carbono para estimar los *stocks* y flujos del carbono orgánico del suelo en respuesta a los cambios de uso del suelo.

El IPCC describe tres aproximaciones o niveles para estimar los cambios en el COS y asume que cuanto mayor sea el nivel, mayor será la precisión de las estimaciones, así como también lo serán la complejidad y la necesidad de información. En el mencionado Volumen (“Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra”) (IPCC, 2006; 2021) se describe que en el caso del Nivel 1 se utilizan los valores por defecto propuestos por el IPCC y, en el Nivel 2, los valores son derivados a partir de información local. Por último, el Nivel 3 incluye modelos más complejos en que los sistemas de inventario son generados a partir de datos de alta resolución que capturan mejor la variabilidad de las condiciones locales.

En este estudio se llevó a cabo una metodología donde se combinan estrategias correspondientes a los Nivel 1 y 2. Se derivó del Nivel 1 el dato inicial del COS de referencia. Sin embargo, con la finalidad de mejorar las estimaciones, el Nivel 2, que emplea el mismo abordaje metodológico que en el Nivel 1, ha sido aplicado utilizando factores de cambio que se basan en datos específicos de la región y de cada UA, sobre todo, en lo referido a las categorías más importantes de uso de la tierra, utilizándose datos de resolución temporal y espacial y de actividad más desagregados.

La fórmula diseñada por el IPCC ha sido aplicada a las UA del partido de Tandil en dos períodos de análisis 1989–2004 y 2004–2019.

Se seleccionó el año 1989 como primer punto de análisis ante la necesidad de contar con un escenario perteneciente al contexto productivo previo a la eclosión de un importante proceso de cambio tecnológico y de una nueva lógica empresarial vinculada a la siembra directa. Hasta entonces, los sistemas “mixtos” permitieron que los campos pampeanos mantuvieran, incluso, aumentaran su calidad en nutrientes y materias orgánicas con ciclos de cultivos y pasturas que, manejados de manera extensiva prácticamente sin insumos externos, emulaban hasta las décadas del setenta y ochenta del siglo XX, aquellos recomendados en manejo por la producción orgánica (Pengue, 2014). Es a partir de esta fecha que el incipiente dinamismo de los mercados internacionales, más las reformas en la economía local, la reducción de los precios de los insumos y maquinarias agrícolas, producen las condiciones para que se lleve a cabo un abrupto proceso de capitalización caracterizado por modernización tecnológica y concentración productiva. Las reformas llevadas a cabo implicaron profundos cambios en el manejo, las formas de producción, la apropiación

de los recursos, el capital económico y financiero, los recursos humanos y de impactos ambientales; más allá de la escala creciente en la producción anual de los cultivos de exportación (Bisang, Anlló y Campi, 2008).

Precisamente, desde el año 2004, la tendencia en el cambio de los precios internacionales de las materias primas ha generado una presión de demanda de tierras para cultivos que motoriza un proceso de agricultura continua y “desganaderización” de la Región Pampeana en el cual es decisivo el papel de la soja (Leavy y Allen, 2015). Por otro lado, las consecuencias ambientales en relación a la estabilidad de la estructura de los suelos, pérdida de nutrientes, disponibilidad de materia orgánica (MO) y pérdida de riqueza biótica comienza a hacerse visible (Viglizzo *et al.*, 2011; Pengué, 2014).

Por último, la selección del año 2019 responde a la necesidad de una imagen actualizada y a la necesidad de constatar las tendencias observadas por diversos autores, como Modernel (2016) y Lara *et al* (2019), quienes han sugerido que para ese año un alto impacto sobre el funcionamiento ecosistémico acrecentado a medida que los planteos agrícolas y ganaderos se vuelven más intensivos. Principalmente, estos están asociados a cambios en el uso del suelo, la intensificación de las prácticas productivas y el riesgo de contaminación por nutrientes (principalmente nitrógeno y fósforo) y por plaguicidas.

En estudios precedentes del área de estudio (Vazquez y Zulaica, 2011, 2012; Vazquez *et al.*, 2019c; Somoza *et al.*, 2020; Somoza *et al.*, 2021), a partir de la clasificación supervisada de imágenes satelitales, el uso del suelo ha sido categorizado en cuatro clases principales: áreas agrícolas, áreas de pastizales y pasturas (P y P), áreas urbanas y áreas con cuerpos de agua. Para determinar las modificaciones en el *stock* de carbono en el suelo, solo se emplearon los datos asociados a las primeras dos clases de usos del suelo.

Los factores asignados a las UA han sido iguales para aquellas unidades que conforman un mismo SEP, puesto que las formas de producir en cada sistema son homogéneas. Para estimar las existencias carbono asociadas a las actividades productivas se necesita información que represente a varias categorías de uso de la tierra estratificadas en base a prácticas de uso y a características biofísicas, como por ejemplo, la zona ecológica, el suelo, el tipo de vegetación, entre otras. Así se crean unidades espaciales

más homogéneas que se utilizan en la estimación y en la evaluación de los cambios en las existencias de carbono. Por ese motivo, es que se tiene en cuenta el uso de las UA como unidades territoriales de análisis.

Para las estimaciones, en primera instancia, se clasifica al total del área de estudio en función de su clima y suelo característicos y se asignan contenidos de COS de referencia (COS<sub>ref</sub>) que representan la condición nativa por defecto. Luego se corrigen dichos contenidos por factores de cambio (Fc) que dependen del uso del suelo y su gestión (IPCC, 2006; 2019; Villarino *et al.*, 2014). La fórmula para estimar el stock de carbono orgánico del suelo queda definido de la siguiente manera:

$$COS_{it} = COSI * FLU_i * FMG_i * FI_i * A_i$$

Dónde:

- *i* es la *i*-ésima UA con un determinado clima, suelo y combinación de uso del suelo,
- *t* es el año correspondiente al inicio del período inventariado,
- *COS<sub>it</sub>* es el carbono orgánico del suelo estimado (Mg C ha<sup>-1</sup>), corresponde al COS<sub>2</sub> o COS final del período 1989-2004 y 2004-2019. Para cada período mencionado se estimó: COS1: primer año de análisis y COS2: último año de análisis
- *COSI* es el contenido inicial de COS (Mg C ha<sup>-1</sup>), corresponde al COS-*ref* para el cálculo del COS inicial del año 1989 y al COS1 del período 1989 – 2004 y 2004 - 2019.
- FLU (Factor de uso del suelo) es el factor de cambio del *stock* debido a un uso del suelo particular (adimensional),
- FMG (Factor de manejo) es el factor de cambio del *stock* debido a un determinado régimen de manejo (por ejemplo, diferentes métodos de labranza en áreas cultivadas) (adimensional),
- FI es el factor de cambio del *stock* debido a un input de C en el suelo (adimensional),
- A es el área con el mismo clima, tipo de suelo, uso del suelo y manejo en un período de tiempo inventariado (ha).

Luego, se calculó la diferencia entre ambos para conocer el cambio en el período y se divide por la cantidad de años (Y) para calcular la tasa de cambio anual (Villarino *et al.*, 2014):

$$\Delta COSi = \frac{COSi2 - COSi1}{Y}$$

Para este análisis se realizó la combinación de áreas agrícolas “viejas” (que ya eran agrícolas en la fecha previa) y “nuevas” (que poseían un uso del suelo de PyP que se transformaron a agricultura) a partir de la proporción de superficie que ocupa cada una en el territorio.

Específicamente para este trabajo, es importante mencionar que el *stock* de referencia de COS (COS1 período 1989–2004) se obtuvo de la literatura local. Villarino *et al.* (2014) realizaron un promedio de valores obtenidos de diversos artículos en los que se evaluó el COS en condiciones prístinas o semiprístinas (Andriulo *et al.*, 2012).

A su vez, para determinar los valores de los factores de cambio empleados para el cálculo de COS se realizaron entrevistas a informantes calificados del área de estudio, las cuales permitieron conocer las producciones y métodos característicos de cada unidad así como derivar distintos supuestos. Por ejemplo, para ambos períodos de análisis se consideró que existieron modificaciones en los usos del suelo, así como también continuidades. De esta manera, los factores de cambio se determinaron para:

- Áreas de PyP que continúan siendo de PyP,
- Áreas que al inicio del período poseían un uso del suelo de PyP pero que se modificó por el uso del suelo agrícola al finalizar el período,
- Áreas agrícolas que continúan con dicha actividad.

Se consideró que los campos de la RPA en general se gestionaron como campos naturales hasta las últimas décadas del siglo XIX. Hasta 1990, por un lado, las zonas más deprimidas de la región representadas en el área de estudio por las Planicies distales estaban ocupadas por ganado vacuno que se alimentaba de praderas naturales o sembradas con pastos perennes o introducidos. Por otro lado, en las zonas de las Llanuras periserranas y sectores colindantes de las Serranías primaba un sistema extensivo o semiextensivo de producción agropecuaria basado en una rotación en

el mismo predio de cultivo de granos con la siembra de pasturas perennes para alimentar el ganado.

### ***Descripción de los Factores de Cambio empleados***

#### *Factor de uso del suelo*

Para determinar el factor de uso del suelo (FLU) se emplearon tres categorías planteadas por el IPCC (2006; 2019) que definen los usos característicos del área de estudio a lo largo del período de análisis:

- Ecosistemas nativos o manejados de manera nominal (ENAT): tierras bajo vegetación nativa, con mínima perturbación humana, sobre las que se basan las reservas de carbono de referencia. Se consideraron ENAT a las UA de las Serranías para conocer el *stock* de COS inicial del año 1989.
- Pastizales y Pasturas: representa tierras cubiertas de pastos continuos donde el uso principal de la tierra es pasto. Los factores de gestión se utilizan para expresar el grado de mejora o degradación de la gestión.
- Áreas cultivadas a largo plazo: representa el área que se ha gestionado de forma continua durante más de 20 años, hasta cultivos predominantemente anuales.

#### *Factor sistema de manejo*

Para tierras de cultivo, el factor de gestión representa el tipo de labranza (IPCC, 2006; 2019):

- Siembra directa: sin labranza primaria, con una mínima alteración del suelo en la zona de siembra. Los herbicidas se utilizan normalmente para el control de malezas.
- Labranza convencional: implica una alteración sustancial del suelo con inversión total, incluso, operaciones de labranza frecuentes (dentro de un año). En el momento de la siembra, poco de la superficie está cubierta por residuos (por ejemplo, menos del 30%).

Para el año 1989 se consideró que la labranza convencional representaba el sistema de manejo en la totalidad del partido de Tandil. No obstante, hacia los años 2004 y 2019, la siembra directa gana protagonismo,

se introdujo en 1990 y 1996 fue adoptada crecientemente por los productores (Villarino *et al.*, 2014). Por consiguiente, para cada año se multiplicó el FMG por el porcentaje de área bajo cada sistema de manejo, como se observa en la Tabla 2, la Tabla 3 y la Tabla 4. Según datos de la Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa (AAPRESID) (2012), en 2006 el 70% de la superficie agrícola de Argentina se encontraba bajo un sistema de siembra directa. Específicamente, en el área de estudio el porcentaje de superficie agrícola que empleaba la sistema de siembra directa es mayor al promedio nacional, ya que Tandil es uno de los primeros partidos en implementar dicho sistema, en el cual, la apropiación se dio de forma temprana y extendida de acuerdo a Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola (AACREA).

Para PyP el factor de gestión representa el nivel de mejor o degradación de la gestión (IPCC, 2006; 2019):

- Pastizales no degradados: representan pastizales no degradados y gestionados de forma sostenible, pero sin mejoras de gestión significativas.
- Pastizales mejorados: representan pastizales que se gestionan de forma sostenible con una presión de pastoreo moderada y que reciben al menos una mejora (por ejemplo, fertilización, mejora de especies, riego).

#### *Factor de input (FI)*

Los factores de entrada representan el efecto de cambiar el ingreso de carbono al suelo, en función del rendimiento de los residuos del cultivo, la frecuencia del barbecho desnudo, la intensidad del cultivo o la aplicación de enmiendas (IPCC, 2006; 2019):

- Bajo: el bajo retorno de residuos se debe a la eliminación de residuos (mediante recolección o quema), el frecuente barbecho desnudo o la producción de cultivos que producen pocos residuos (por ejemplo, hortalizas, tabaco, algodón).
- Medio: los sistemas de cultivo de insumos medios representan el cultivo anual de cereales en el que todos los residuos de cultivos se devuelven al campo. Si se eliminan los residuos, se agrega materia orgánica suplementaria (por ejemplo, estiércol). Esta categoría fue la utilizada para caracterizar la mayoría de las UA ya que el IPCC reconoce que la

misma es representativa para cultivos anuales con cereales donde todos los residuos del cultivo son devueltos al territorio.

- Alto: las rotaciones de insumos altos (sin estiércol) tienen insumos de residuos de cultivos significativamente mayores debido a la producción de cultivos con alto rendimiento de residuos, el uso de abonos verdes, cultivos de cobertura, barbechos con vegetación mejorada, uso frecuente de pastos perennes en las rotaciones anuales de cultivos, pero sin la aplicación de abono.

A continuación, se describen en la Tablas 2, la Tabla 3 y la Tabla 4, las categorías de Fc empleados específicamente en cada período y en cada unidad con sus respectivos valores:

**Tabla 2.** Factores de cambio empleados para el cálculo del COS inicial de 1989 asociado a áreas de Pastizales y Pasturas y áreas Agrícolas.

SEP	UA	Desde un sistema Nativo			A un sistema Pastizales y Pasturas -1989				A un sistema Agrícola- 1989			
		Uso del suelo (FLU)	Sistema de manejo (FMG)	In-puts (FI)	Uso del suelo (FLU)	Sistema de manejo (FMG)	Inputs (FI)	COS Ref (Mg C ha-1)	Uso del suelo (FLU)	Siste-ma de manejo (FMG)	Inputs (FI)	COS Ref (Mg C ha-1)
LLP	1	PyP	ND (1)	-	PyP (1)	Mejorado (1,14)	Medio (1)	86,00	CLP (0,71)	LC (1)	Medio (1)	61,06
	2	PyP	ND (1)	-	PyP (1)	Mejorado (1,14)	Medio (1)	86,00	CLP (0,71)	LC (1)	Medio (1)	61,06
	3	PyP	ND (1)	-	PyP (1)	Mejorado (1,14)	Medio (1)	86,00	CLP (0,71)	LC (1)	Medio (1)	61,06
PD	4	PyP	ND (1)	-	PyP (1)	No degradado (1)	-	86,00	CLP (0,71)	LC (1)	Medio (1)	61,06
	5	PyP	ND (1)	-	PyP (1)	No degradado (1)	-	86,00	CLP (0,71)	LC (1)	Medio (1)	61,06
	6	PyP	ND (1)	-	PyP (1)	No degradado (1)	-	86,00	CLP (0,71)	LC (1)	Medio (1)	61,06
S	7	NE	-	-	PyP (1)	-	-	86,00	PyP (1)	-	-	86,00
	8	NE	-	-	PyP (1)	-	-	86,00	PyP (1)	-	-	86,00

Nota: PyP (pastizales y pasturas); NE (ecosistemas nativos); ND (no degradados); - (no aplica); CLP (cultivado a largo plazo); LC (labranza convencional).

Fuente: Elaboración personal

**Tabla 3.** Factores de cambio empleados para el cálculo del COS final (COS2) de 2004 a partir del COS inicial (COS1) de 1989 en sus respectivas modificaciones o continuidades en los usos del suelo.

1989 – 2004										
SEP	UA	Desde un sistema de PyP a PyP			Desde un sistema de PyP a Agrícola			Desde un sistema Agrícola a Agrícola		
		Uso del suelo (FLU)	Sistema de manejo (FMG)	Inputs (FI)	Uso del suelo (FLU)	Sistema de manejo (FMG)	Inputs (FI)	Uso del suelo (FLU)	Sistema de manejo (FMG)	Inputs (FI)
LLP	1	PyP (1)	Mejorado (1,14)	Medio (1)	CLP (0,71)	LC (30%) (1)	Medio (1)	CLP (0,71)	LC (30%) (1)	Medio (1)
						SD (70%) (1,16)			SD (70%) (1,16)	
	2	PyP (1)	Mejorado (1,14)	Medio (1)	CLP (0,71)	LC (30%) (1)	Medio (1)	CLP (0,71)	LC (30%) (1)	Medio (1)
						SD (70%) (1,16)			SD (70%) (1,16)	
	3	PyP (1)	Mejorado (1,14)	Medio (1)	CLP (0,71)	LC (30%) (1)	Medio (1)	CLP (0,71)	LC (30%) (1)	Medio (1)
						SD (70%) (1,16)			SD (70%) (1,16)	
PD	4	PyP (1)	Mejorado (1,14)	Medio (1)	CLP (0,71)	LC (40%) (1)	Alto (1,11)	CLP (0,71)	LC (40%) (1)	Alto (1,11)
						SD (60%) (1,16)			SD (60%) (1,16)	
	5	PyP (1)	Mejorado (1,14)	Medio (1)	CLP (0,71)	LC (40%) (1)	Alto (1,11)	CLP (0,71)	LC (40%) (1)	Alto (1,11)
						SD (60%) (1,16)			SD (60%) (1,16)	
	6	PyP (1)	Mejorado (1,14)	Medio (1)	CLP (0,71)	LC (40%) (1)	Alto (1,11)	CLP (0,71)	LC (40%) (1)	Alto (1,11)
						SD (60%) (1,16)			SD (60%) (1,16)	
S	7	PyP (1)	ND (1)	-	CLP (0,71)	LC (30%) (1)	Medio (1)	CLP (0,71)	LC (30%) (1)	Medio (1)
						SD (70%) (1,16)			SD (70%) (1,16)	
	8	PyP (1)	ND (1)	-	CLP (0,71)	LC (30%) (1)	Medio (1)	CLP (0,71)	LC (30%) (1)	Medio (1)

Notas: PyP (pastizales y pasturas); ND (no degradados);- (no aplica); CLP (cultivado a largo plazo); LC (labranza convencional); SD (siembra directa).

Fuente: Elaboración personal

**Tabla 4.** Factores de cambio empleados para el cálculo del COS final (COS2) de 2019 a partir del COS inicial (COS1) de 2004 en sus respectivas modificaciones o continuidades en los usos del suelo.

2004 – 2019										
SEP	UA	Desde un sistema de PyP a PyP			Desde un sistema de PyP a Agrícola			Desde un sistema Agrícola a Agrícola		
		Uso del suelo (FLU)	Sistema de manejo (FMG)	Inputs (FI)	Uso del suelo (FLU)	Sistema de manejo (FMG)	Inputs (FI)	Uso del suelo (FLU)	Sistema de manejo (FMG)	Inputs (FI)
LLP	1	PyP (1)	Mejorado (1,14)	Alto (1,11)	CLP (0,71)	LC (5%) (1)	Medio (1)	CLP (0,71)	LC (5%) (1)	Medio (1)
						SD (95%) (1,16)				
	2	PyP (1)	Mejorado (1,14)	Alto (1,11)	CLP (0,71)	LC (5%) (1)	Medio (1)	CLP (0,71)	LC (5%) (1)	Medio (1)
	3	PyP (1)	Mejorado (1,14)	Alto (1,11)	CLP (0,71)	LC (5%) (1)	Medio (1)	CLP (0,71)	LC (5%) (1)	Medio (1)
PD	4	PyP (1)	Mejorado (1,14)	Alto (1,11)	CLP (0,71)	LC (10%) (1)	Alto (1,11)	CLP (0,71)	LC (10%) (1)	Alto (1,11)
						SD (90%) (1,16)				
	5	PyP (1)	Mejorado (1,14)	Alto (1,11)	CLP (0,71)	LC (10%) (1)	Alto (1,11)	CLP (0,71)	LC (10%) (1)	Alto (1,11)
	6	PyP (1)	Mejorado (1,14)	Alto (1,11)	CLP (0,71)	LC (10%) (1)	Alto (1,11)	CLP (0,71)	LC (10%) (1)	Alto (1,11)
S	7	PyP (1)	ND (1)	-	CLP (0,71)	LC (5%) (1)	Medio (1)	CLP (0,71)	LC (5%) (1)	Medio (1)
									SD (95%) (1,16)	
	8	PyP (1)	ND (1)	-	CLP (0,71)	LC (5%) (1)	Medio (1)	CLP (0,71)	LC (5%) (1)	Medio (1)

Nota: PyP (pastizales y pasturas); ND (no degradados);- (no aplica); CLP (cultivado a largo plazo); LC (labranza convencional); SD (siembra directa).

Fuente: Elaboración personal.

## Resultados

### *Variaciones del stock de COS por hectárea*

En primera instancia, se han analizado las variaciones en el stock de COS por hectárea y tasa de cambio anual por hectárea por período en cada UA. Por un lado, se evidencia en de la Tabla 5 y en la Tabla 6 que la continuidad en el uso de suelo de PyP significa un aumento en el stock de C en el suelo de todas las UA. Por otro lado, aquella superficie destinada a la

agricultura al finalizar el período de análisis presenta una disminución en el *stock* de C. A su vez, si en dicha superficie previamente primaba la actividad ganadera (asociada a áreas de PyP), la modificación en el *stock* es de mayor magnitud que si en el territorio primaba ya la actividad agrícola. Se desprende entonces que la transformación en el uso del suelo representa una merma radical en el *stock* de COS por hectárea.

En las áreas de PyP, la continuidad de la actividad trae aparejado COS iniciales de valores más elevados que en aquellas áreas que evidencian una continuidad en la actividad agrícola o una transformación de la actividad ganadera a agrícola. Por consiguiente, la diferencia en el *stock* de COS resulta positiva y creciente en el tiempo (Tabla 5 y Tabla 6). Por este mismo motivo aquellas áreas que modificaron su uso del suelo de PyP para agricultura la diferencia es menor en el segundo período que en el primero ya que contaban con un *stock* de COS inicial más elevado.

La situación inversa se observa en las áreas de cultivo que se mantienen en el tiempo. En ellas, las diferencias en el *stock* y la tasa de cambio anual son mayores en el caso del primer período de análisis, 1989–2004. A medida que se perpetúa la agricultura en el tiempo, los *stocks* iniciales para el cálculo se reducen considerablemente.

**Tabla 5.** Modificaciones en el *stock* de COS durante el período 1989–2004 por hectárea en tres situaciones de cambios o continuación de usos del suelo.

1989- 2004												
UA	PyP a PyP				PyP a Agrícola				Agrícola a Agrícola			
	COS1 (Mg C ha <sup>-1</sup> )	COS2 (Mg C ha <sup>-1</sup> )	Diferencia (Mg C ha <sup>-1</sup> )	Cambio anual (Mg C ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> )	COS1 (Mg C ha <sup>-1</sup> )	COS2 (Mg C ha <sup>-1</sup> )	Diferencia (Mg C ha <sup>-1</sup> )	Cambio anual (Mg C ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> )	COS1 (Mg C ha <sup>-1</sup> )	COS2 (Mg C ha <sup>-1</sup> )	Diferencia (Mg C ha <sup>-1</sup> )	Cambio anual (Mg C ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> )
1	98,04	111,77	13,73	0,92	98,04	77,40	-20,64	-1,38	61,06	48,21	-12,85	-0,86
2	98,04	111,77	13,73	0,92	98,04	77,40	-20,64	-1,38	61,06	48,21	-12,85	-0,86
3	98,04	111,77	13,73	0,92	98,04	77,40	-20,64	-1,38	61,06	48,21	-12,85	-0,86
4	86	98,04	12,04	0,80	86,00	74,28	-11,72	-0,78	61,06	52,74	-8,32	-0,55
5	86	98,04	12,04	0,80	86,00	74,28	-11,72	-0,78	61,06	52,74	-8,32	-0,55
6	86	98,04	12,04	0,80	86,00	74,28	-11,72	-0,78	61,06	52,74	-8,32	-0,55
7	86	86,00	0,00	0,00	86,00	67,90	-18,10	-1,21	86,00	67,90	-18,10	-1,21
8	86	86,00	0,00	0,00	86,00	67,90	-18,10	-1,21	86,00	67,90	-18,10	-1,21

Fuente: Elaboración personal.

**Tabla 6.** Modificaciones en el *stock* de COS durante el período 2004–2019 por hectárea en tres situaciones de cambios o continuación de usos del suelo.

2004 – 2019												
UA	PyP a PyP				PyP a Agrícola				Agrícola a Agrícola			
	COS1 (Mg C ha <sup>-1</sup> )	COS2 (Mg C ha <sup>-1</sup> )	Diferencia (Mg C ha <sup>-1</sup> )	Cambio anual (Mg C ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> )	COS1 (Mg C ha <sup>-1</sup> )	COS2 (Mg C ha <sup>-1</sup> )	Diferencia (Mg C ha <sup>-1</sup> )	Cambio anual (Mg C ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> )	COS1 (Mg C ha <sup>-1</sup> )	COS2 (Mg C ha <sup>-1</sup> )	Dife- rencia (Mg C ha <sup>-1</sup> )	Cambio anual (Mg C ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> )
1	111,77	141,43	29,66	1,98	111,77	101,03	-10,73	-0,72	48,21	39,43	-8,78	-0,59
2	111,77	141,43	29,66	1,98	111,77	101,03	-10,73	-0,72	48,21	39,43	-8,78	-0,59
3	111,77	141,43	29,66	1,98	111,77	101,03	-10,73	-0,72	48,21	39,43	-8,78	-0,59
4	98,04	124,06	26,02	1,73	98,04	87,63	-10,41	-0,69	47,51	38,59	-8,92	-0,59
5	98,04	124,06	26,02	1,73	98,04	87,63	-10,41	-0,69	47,51	38,59	-8,92	-0,59
6	98,04	124,06	26,02	1,73	98,04	87,63	-10,41	-0,69	47,51	38,59	-8,92	-0,59
7	86,00	98,04	12,04	0,80	86,00	77,74	-8,26	-0,55	67,90	55,54	-12,36	-0,82
8	86,00	98,04	12,04	0,80	86,00	77,74	-8,26	-0,55	67,90	55,54	-12,36	-0,82

Fuente: Elaboración personal.

Las UA correspondientes a las Llanuras periserranas exhiben los valores más elevados en los COS finales (COS2) para las situaciones de continuidad en PyP y transformación de PyP a uso agrícola. Dichas UA se asocian a los sectores con mejores combinaciones de factores ecológicos y productivos para la actividad mixta agrícola ganadera en el primer período que se transforma predominantemente en actividad agrícola en el segundo período. Es en estas mismas áreas en las cuales se han desarrollado los establecimientos de mayores dimensiones y con mayor capacidad de inversión.

### *Variaciones del stock de COS por Unidades Ambientales*

#### *Período 1989–2004*

La Tabla 7 expone, en relación a la continuidad de los usos del suelo de PyP, una merma en el *stock* de COS que no está dado por sus factores de cambio (se observa en la Tabla 6 que el *stock* de COS por hectárea aumenta) sino por la pérdida de superficie destinada a dicho uso.

**Tabla 7.** Modificaciones en el stock de COS durante el período 1989-2004 por UA para áreas de PyP y áreas agrícolas.

1989 – 2004							
A PASTIZALES Y PASTURAS							
UA	ÁREA 1 (ha)	ÁREA 2 (ha)	DIFERENCIA ÁREA (ha)	DIFERENCIA COS (Mg C ha <sup>-1</sup> )	CAMBIO ANUAL (Mg C ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> )	CAMBIO EN COS POR SUPERFICIE AGRÍCOLA ADICIONAL	
						ANUAL (Mg C yr <sup>-1</sup> )	TOTAL PERÍODO (Mg C)
1	13497	7566	-5931	-477627,35	-31841,82	-5427,10	-81406,53
2	113194	78342	-34852	-2341599,12	-156106,61	-31890,97	-478364,61
3	8973	6057	-2916	-202748,68	-13516,58	-2668,26	-40023,85
4	33070	25943	-7127	-300568,28	-20037,89	-5720,61	-85809,08
5	5955	5856	-99	61992,24	4132,82	-79,46	-1191,96
6	60539	57294	-3245	410749,76	27383,32	-2604,65	-39069,80
7	34731	30000	-4731	-406866,00	-27124,40	-	-
8	10727	6610	-4117	-354062,00	-23604,13	-	-
A SISTEMAS DE CULTIVOS							
1	10295	16163	5868	-253399,28	-16893,29	-6133,13	-91996,97
2	95440	129617	34177	-1931844,26	-128789,62	-33958,84	-509382,58
3	8074	10979	2905	-163712,32	-10914,15	-2887,84	-43317,63
4	32613	39614	7001	-353335,91	-23555,73	-4163,01	-62445,21
5	7319	7412	93	-61976,14	-4131,74	-51,84	-777,63
6	43617	46504	2887	-396674,66	-26444,98	-1641,72	-24625,83
7	9104	13733	4629	-248584,88	-16572,33	-5586,06	-83790,83
8	4185	8301	4116	-150258,73	-10017,25	-4966,99	-74504,87

Fuente: Elaboración personal.

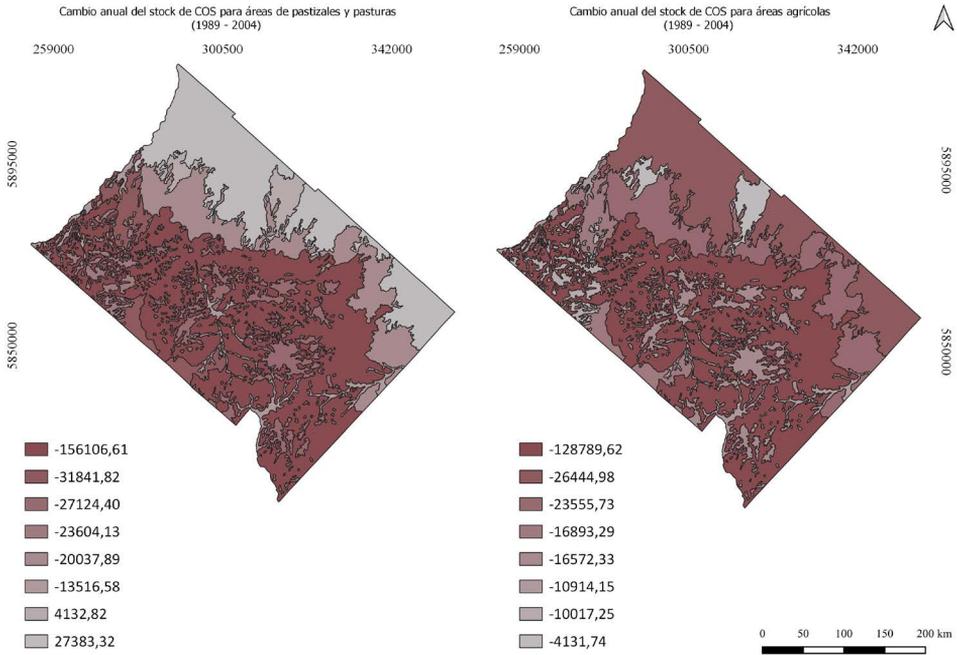
Se evidencia en la Tabla 7 - Figura 3 que las UA con continuidad en el uso del suelo de PyP que reportaron las mayores reducciones en el stock de COS han sido las UA2 y UA1 pertenecientes a las Llanuras periserranas (). Esto ocurre como resultado de la combinación de dos factores: una mayor pérdida de superficie de PyP en dicho SEP y de los valores más elevados de mejora en el *stock* dados por una mejor gestión de dicho territorio (mayores valores de FMG desde el año 1989 que se pierden por hectárea debido a dicha transformación). Por consiguiente, el cambio en la superficie de suelo en dichas UA trae aparejado una mayor pérdida del *stock* de COS.

Luego, las mayores pérdidas se localizan en las UA asociadas a las Serranías (UA7 y UA8) generadas exclusivamente por la disminución en la superficie dedicada a PyP ya que sus stocks de COS se mantienen constantes.

Con respecto al análisis de los resultados obtenidos para el cambio de usos de suelo de áreas de PyP a tierras de cultivo o que mantienen la actividad agrícola como preponderante se observa que la diferencia en el *stock* de COS es mayor en las UA2 (Llanura periserrana), UA6 y UA4 (Planicies distales) (datos evidenciados en Tabla 7 - Figura 3). No obstante, el cambio en el *stock* por superficie agrícola adicional es radical en las UA2 y UA1, de las Llanuras periserranas y las dos UA serranas (UA7 y UA8) ya que son los sistemas ecológicos con mayor diferencia en el COS por hectárea individual.

En las UA de la Planicie distal si bien la superficie de cambio en el uso del suelo es mayor que en las serranías, dichas UA tienen el valor del factor input alto (1,11). Este valor fue establecido a partir de la información brindada por productores del área de estudio en entrevistas semiestructuradas dado que el ingreso de residuos al área es significativamente mayor debido a que en ella conviven la producción de cultivos con alto rendimiento de residuos con el uso de cultivos de cobertura y uso frecuente de pastos perennes en las rotaciones anuales de cultivos, inputs asociados a la actividad ganadera.

**Figura 3.** Cambio anual del *stock* de COS (Mg C ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>) durante el período 1989-2004 por UA para áreas de PyP y áreas agrícolas.



Fuente: Elaboración personal.

*Período 2004–2019*

Durante el período 2004–2019 las UA2, UA4 y UA6 exhiben los mayores valores de diferencia en el *stock* de COS y las mayores pérdidas de *stock* por superficie agrícola adicional, como se observa en la Tabla 8 y la Figura 4, ambos datos asociados a los avances más significativos del proceso de agriculturización en el partido. Esta situación se reproduce tanto en áreas que continúan siendo de PyP como en aquellas que a finales del período son tierras de cultivo.

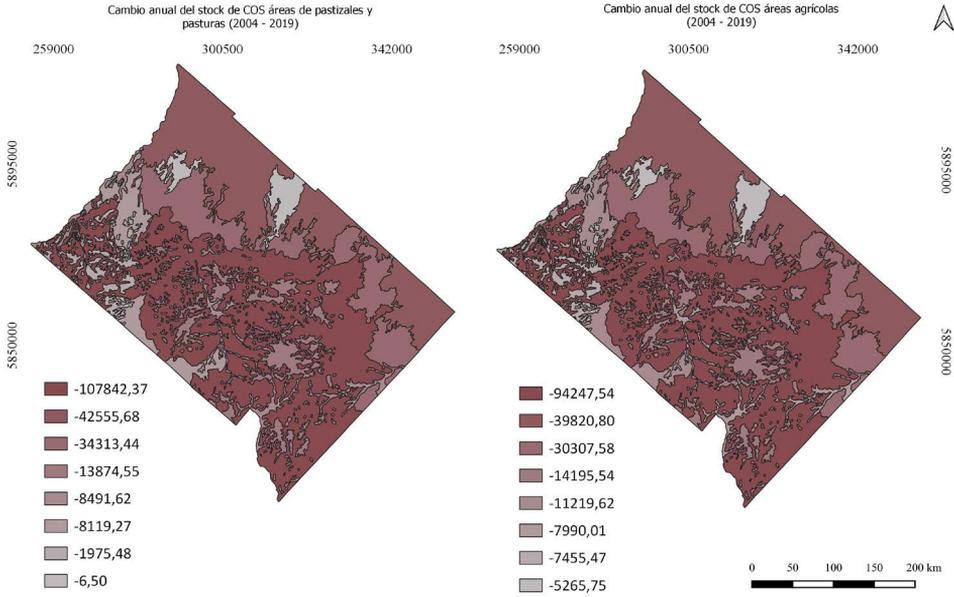
Cabe destacar, como se mencionó con anterioridad, las UA de Llanuras periserranas poseen las mejores condiciones agroecológicas para el desarrollo de la actividad agrícola y en ellas se sitúan las producciones de mayores capitales. Por eso mismo, si bien se reduce el valor del *stock* de COS, la agriculturización avanza notablemente y no encuentra obstáculo en la merma ya que, en general, se reemplaza por insumos externos.

**Tabla 8.** Modificaciones en el *stock* de COS durante el período 2004–2019 por UA para áreas de PyP y áreas agrícolas.

2004 - 2019							
A PASTIZAL Y PASTURAS							
UA	ÁREA 1 (ha)	ÁREA 2 (ha)	DIFERENCIA ÁREA (ha)	DIFERENCIA COS (Mg C ha <sup>-1</sup> )	CAMBIO ANUAL (Mg C ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> )	CAMBIO EN COS POR SUPERFICIE AGRÍCOLA ADICIONAL	
						ANUAL (Mg C yr <sup>-1</sup> )	TOTAL PERÍODO (Mg C)
1	7566	5118	-2448	-121789,05	-8119,27	-4840,93	-72614,02
2	78342	50473	-27869	-1617635,59	-107842,37	-55111,12	-826666,73
3	6057	3886	-2171	-127374,29	-8491,62	-4293,17	-64397,48
4	25943	16353	-9590	-514701,55	-34313,44	-16635,34	-249530,04
5	5856	4627	-1229	-97,47	-6,50	-2131,89	-31978,35
6	57294	40132	-17162	-638335,22	-42555,68	-29770,14	-446552,08
7	30000	24193	-5807	-208118,28	-13874,55	-4661,09	-69916,28
8	6610	5496	-1114	-29632,16	-1975,48	-894,17	-13412,56
A SISTEMAS DE CULTIVOS							
1	10295	18625	8330	-168294,26	-11219,62	-5017,95	-75269,32
2	95440	155334	59894	-1413713,09	-94247,54	-36340,16	-545102,37
3	8074	13167	5093	-119850,20	-7990,01	-3090,54	-46358,10
4	32613	49332	16719	-454613,72	-30307,58	-10271,48	-154072,14
5	7319	8647	1328	-78986,26	-5265,75	-808,71	-12130,65
6	43617	64022	20405	-597312,03	-39820,80	-12691,63	-190374,43
7	9104	18959	9855	-212933,12	-14195,54	-7378,93	-110683,89
8	4185	9416	5231	-111832,02	-7455,47	-4141,84	-62127,58

Fuente: Elaboración personal.

**Figura 4.** Cambio anual del *stock* de COS ( $\text{Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ) durante el período 2004-2019 por UA para áreas de PyP y áreas agrícolas.



Fuente: Elaboración personal.

Por otra parte, la Tabla 9 expone la diferencia entre los valores de *stock* de COS potenciales que podrían obtenerse si continuará la tendencia del uso del suelo y las técnicas iniciales del período versus los valores obtenidos. Los valores se encuentran tanto en  $\text{Mg C}$  como en porcentajes. Se destaca principalmente, que las áreas que mantienen un uso de suelo dedicado a PyP en ambos períodos presentan diferencias positivas, es decir, el uso del suelo y los factores de cambio asociados favorecen el aumento del *stock* de COS.

En contraposición, aquellas áreas que se mantienen o se transforman hacia un uso del suelo agrícola muestran diferencias negativas en ambos períodos y en todas las UA. Las diferencias más notorias se observan, durante el primer período de análisis, en las UA de las Serranías (-26,66 % en UA7 y UA8). Durante el segundo período, estos valores corresponden a las UA1 y UA4 de la Llanura Periserrana (-23,61 % y -17,19 %, respectivamente) y a la UA 8 de las Serranía (-16,73 %).

**Tabla 9.** Stock de COS potencial y real durante los períodos 1989–2004 y 2004–2019 por clase de uso del suelo y por UA.

UA	a PyP			a Agrícola		
	Stock potencial (Mg C)	Diferencia (Mg C)	% de diferencia	Stock potencial (Mg C)	Diferencia (Mg C)	% de diferencia
1989 - 2004						
1	741770,64	103847,89	12,28	986912,78	-36400,64	-3,83
2	7680649,68	1075290,96	12,28	7914414,02	-667978,80	-9,22
3	593828,28	83135,96	12,28	670377,74	-56285,42	-9,17
4	2231098,00	312353,72	12,28	2418830,84	-178730,97	-7,98
5	503616,00	70506,24	12,28	452576,72	-59656,72	-15,18
6	4927284,00	689819,76	12,28	2839534,24	-324672,88	-12,91
7	2580000,00	0,00	0,00	1181038,00	-248584,88	-26,66
8	568460,00	0,00	0,00	713886,00	-150258,73	-26,66
2004 - 2019						
1	572016,34	151813,14	20,97	1095297,20	-209237,18	-23,61
2	5641145,13	1497159,92	20,97	8684183,15	-975032,15	-12,65
3	434321,12	115268,83	20,97	736474,50	-82504,94	-12,62
4	1603248,12	425502,05	20,97	2789635,14	-409258,74	-17,19
5	453631,08	120393,69	20,97	458388,99	-64118,76	-16,26
6	3934541,28	1044227,26	20,97	3462206,57	-132441,91	-3,98
7	2080598,00	291283,72	12,28	1287291,83	-118335,83	-10,12
8	472656,00	66171,84	12,28	639334,35	-91649,09	-16,73

Fuente: Elaboración personal.

### Discusión de Resultados

Los suelos son el mayor reservorio de carbono en los ecosistemas terrestres, aunque, como sostienen Lefèvre *et al.* (2017) los impactos antropogénicos pueden convertirlo en un sumidero neto o una fuente neta de GEI. Para que dicho balance resulte efectivo, como una forma de contrarrestar, al menos en parte, el aumento de las emisiones es pertinente considerar las formas de manejo de la superficie productiva de cada territorio. En este caso, a lo largo del período de análisis los sistemas productivos fueron virando desde un sistema mixto agrícola-ganadero hacia sistemas de agricultura continua y por tanto hacia formas productivas que reducen el COS donde el mencionado balance no se percibe.

Los resultados obtenidos muestran la misma tendencia que el proceso de agriculturización en el área de estudio. Durante el primer período, el territorio comprendido por las UA (2, 7 y 8) que exhibe mayor disminución en el stock de COS coincide con aquellas unidades en las cuales el

avance de la agricultura continua se ha dado con una intensidad alta (para UA2 y UA7) y muy alta (para UA8). Con respecto a la UA2, sus paisajes corresponden a lomas extendidas con índices de productividad moderados que no presentan obstáculos para el desarrollo de la actividad agrícola. No obstante, en las UA 7 y UA8, el paisaje serrano con abundantes afloramientos rocosos sí presenta abundantes limitaciones al avance de la agricultura vinculadas a cuerpos edáficos poco evolucionados y de escasa profundidad debido a la existencia de contactos líticos e índices de productividad bajos. Su nivel de agriculturización es resultado de la combinación de varios factores. Por un lado, un paisaje que no había sido intervenido hasta entonces por otra actividad agrícola (actividad minera y forestal dominante). Por otro lado, una distribución geográfica en parches sobre el territorio que genera que la matriz en la que se encuentra inserta la UAE la inflencie directamente (UAG de niveles altos) (Somoza y Vazquez, 2022).

Los datos evidenciados en las modificaciones del *stock* de C para el segundo período también concuerdan con la tendencia en las transformaciones en los usos del suelo. La actividad agrícola encuentra en las unidades serranas limitaciones físicas debidas a la pendiente y en las unidades periserranas limitaciones de extensión ya que éstas se encontraban cubiertas en su totalidad por cultivos anuales. Por este motivo, la agriculturización, y con ella, la merma en el *stock* de COS continúa avanzando en paisajes de las Planicies distales debido a insumos externos y el confinamiento de la actividad ganadera en producciones intensivas o en las planicies más deprimidas con bajo potencial de escurrimiento superficial situados al noroeste del partido (Somoza y Vazquez, 2022).

A su vez, se evidencia que las áreas de pastizales y pasturas se asocian a aumentos en el *stock* de COS por hectárea. Dichos valores se ven opacados por la reducción de la superficie total dedicada de esta actividad (se reporta, en la mayoría de las UA a excepción de las unidades serranas, un aumento de 12,28 % en el primer período y un 20,97 % en el segundo período).

Contrariamente, las áreas con sistemas de agricultura continua o, cuyo uso del suelo se transforma a agricultura, exhiben una merma en su *stock* de COS por hectárea que se traduce en una reducción del COS a escala de UA (desde un mínimo de -3,98 % a un máximo de -23,61 % en el último período) ocasionada por el avance de la agriculturización en el área de estudio (Somoza y Vazquez, 2022). En esta línea, Álvarez *et al* (2014)

plantean que áreas donde se ha eliminado la rotación agrícola-ganadera y se practica agricultura permanente las diferencias entre aportes de sistemas naturales y cultivados es mayor que en donde se mantiene dicha rotación.

Para revertir las externalidades de la producción agrícola asociadas al C del suelo se requiere la incorporación de labranzas conservacionistas, y/ de cultivos de cobertura. Estos manejos promueven una menor intervención sobre los suelos y permiten que los rastrojos de la cosecha cubran el suelo, aportando materia orgánica y protegiendo el suelo de la erosión eólica e hídrica. Por ejemplo, se han estimado aumentos de los aportes de carbono en suelos cultivados y balances de carbono menos negativos en la actualidad en relación con lo visto hace 30 o 50 años atrás como consecuencia de los mayores aportes de residuos al suelo asociados a incrementos de rendimientos, cultivos de cobertura, mulching, algunos tipos para prácticas agroforestales y pastoreo rotacional (Pabst *et al.*, 2016; Mukumbuta y Hatano, 2020). A su vez, la sinergia entre carbono y nitrógeno permite no solamente incrementar la fertilidad y la productividad de los suelos, sino también aumentar su diversidad biológica, reducir el escurrimiento de agua y la erosión, minimizar la contaminación y actuar como un filtro moderador de los efectos del cambio climático (Viglizzo, 2018)

La cuantificación de las emisiones es fundamental para una serie de propósitos como la planificación nacional para un desarrollo de bajas emisiones, la generación y comercio de bonos de carbono, la certificación de prácticas agrícolas sustentables, etc. (Zomer *et al.*, 2017). Sin embargo, existen aún demasiadas incertidumbres acerca de los métodos de estimación, la escala de análisis, los límites de los sistemas estudiados, además de la alta heterogeneidad espacial característica de las variables asociadas al suelo.

A pesar de ello, trabajos como el presente resultan herramientas útiles para fomentar y avanzar hacia investigaciones de COS mediante metodologías más robustas, por ejemplo derivadas de un Nivel 3 del IPCC. A su vez, resaltan la necesidad de adopción de la gestión de mejora del COS al considerar las diferencias ambientales (ecológicas y productivas) de cada paisaje. En tal sentido, el ordenamiento territorial, como política de gestión y uso del territorio, procura adecuar los usos de la tierra y la ocupación humana del espacio a las aptitudes y restricciones ecológicas y sociales de cada lugar. De este modo no solo se minimizan los conflictos derivados del uso del suelo predominantemente agrícola y los impactos ambientales

negativos, sino que pueden promoverse también nuevas oportunidades de desarrollo. En este sentido, el ordenamiento territorial representa uno de los desafíos contemporáneos en un mundo globalizado, que incluye interacciones complejas entre procesos climatológicos, ambientales, económicos, sociales, políticos e institucionales (Somoza y Vazquez, 2022).

## Conclusiones

La investigación evidenció tanto a escala de hectárea como de UA, en primera instancia, que la continuidad en el uso de suelo de PyP significa un aumento en el *stock* de C en el suelo de todas las UA. En segunda instancia, aquella superficie destinada a la agricultura al finalizar el período de análisis presenta una disminución en el *stock* de C. A su vez, si en dicha superficie primaba la actividad ganadera (asociada a áreas de PyP) la modificación en el *stock* es de mayor magnitud que si en el territorio primaba ya la actividad agrícola.

De esa manera, la intervención antrópica en los suelos va a afectar el capital natural y la provisión de los SE, lo que potencia la provisión de servicios de provisión y deteriorando la provisión de servicios de regulación y culturales. Así, el sector rural enfrenta el desafío de aumentar su producción además de minimizar la emisión de gases efecto invernadero.

El uso que se haga del suelo determinará en gran medida la magnitud de los impactos ambientales asociados. Por este motivo, el análisis de los cambios en el uso del suelo y la situación del COS es fundamental para la adopción de estrategias de gestión ambiental rural adaptadas a las particularidades del territorio.

En el partido de Tandil las UA que reportaron las mayores reducciones en el *stock* de COS por modificaciones en los usos del suelo durante el período 1989-2004 han sido las UA2 y UA 1, ambas pertenecientes a las Llanuras periserranas; y, en UA7 y UA8 del sistema serrano. No obstante, en las áreas en las cuales se observó una continuidad en la actividad ganadera asociada al predominio de PyP, se observó una ganancia en el *stock* de COS por hectárea. Por consiguiente, la disminución en el *stock* en ellas se produjo exclusivamente por la disminución en la superficie dedicada a PyP. Mientras tanto, durante el período 2004–2019 las UA2, UA4 y UA6 (las últimas dos correspondientes a las Planicies distales) exhiben los mayores valores de diferencia en el *stock* de COS.

Es factible el aprovechamiento de avances tecnológicos para mejorar la eficiencia en el uso de insumos en la actividad agrícola, muchos de ellos demandantes de energía fósil y, en última instancia, emisores de CO<sub>2</sub>: cultivos genéticamente mejorados para la obtención de mayores rendimientos y con mayor resistencia a enfermedades y sequía, maquinaria y sistemas de irrigación de bajo costo energético y la aplicación de fertilizantes y plaguicidas mediante agricultura de precisión. De otra manera, es relevante el fomento de la integración de las actividades productivas que se han desacoplado en planteos intensivos e individuales en las últimas tres décadas. Los incentivos para ello podrían partir de la integración de los valores de los ecosistemas y la biodiversidad en la planificación, los procesos de desarrollo y la contabilidad nacional y local.

Se reconoce que el presente trabajo representa los resultados de una ubicación particular y que la magnitud de las diferencias puede variar en distintas ubicaciones debido a las singularidades en el clima, las condiciones del suelo y otras prácticas de manejo y gestión de los paisajes. Sin embargo, se pretende ilustrar el diagnóstico de la situación del *stock* de COS en relación al avance de la agricultura y la intensificación productiva, así como el potencial de las áreas de pastizales y pasturas como una opción de manejo para maximizar el sumidero de carbono y otros SE vinculados.

## Referencias

- Álvarez, R., De Paepe, J. L., Steinbach, H. S., Fernández, P. L. y Alvarez, C. R. (2014). Capítulo 7. Cambios en los niveles de carbono y nitrógeno de los suelos pampeanos producidos por el uso. En: *Suelos, producción agropecuaria y cambio climático: avances en la Argentina*, 97-124x. Pascale Medina, C., Zubillaga, M. y Taboada, M. A. (editores). 1a ed. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación.
- Andrade, F. H., Taboada, M. A., Lema, R. D., Maceira, N. O., Echeverría, H. E., Posse Beaulieu, G. y Mastrangelo, M. E. (2017). *Los desafíos de la agricultura argentina: satisfacer las futuras demandas y reducir el impacto ambiental*. 1a ed. Ediciones INTA.
- Andriulo, A. E., Galantini, J. A., Studdert, G., Sasal, M. C., Wilson, M., Basanta, M., y Restovich, S. (2012). Existencias de carbono orgánico edáfico bajo diferentes usos y tipos de suelo. *XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del suelo and XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Mar del Plata, Argentina.

- Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa. (2012). Evolución de la superficie bajo Siembra Directa en Argentina (Campañas 77/78 – 10/11). <http://www.aapresid.org.ar/superficie/>.
- Bisang, R., Anlló, G., y Campi, M. (2008). Una revolución (no tan) silenciosa. Claves para repensar el agro en Argentina. *Desarrollo Económico*, (48), 190/191, 165-207.
- Iermanó, M. J. y Sarandón, S. (2016). Rol de la agrobiodiversidad en sistemas familiares mixtos de agricultura y ganadería pastoril en la Región Pampeana, Argentina. Su importancia para la sustentabilidad de los agroecosistemas. *Revista Brasileira de Agroecologia*, 11(2), 94-103.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). (2014). *Climate Change 2014: Synthesis, Report Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). (2006). *IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme*. IGES.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). (2019). Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. *Agriculture, Forestry and Other Land Use*. (Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S ed.). Publications - IPCC-TFI.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). (2021). Cambio Climático: Bases Físicas. Informe técnico. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#SPM>
- Johnson, J. A., Runge, C. F., Senauer, B., Foley, J. y Polasky, S. (2014). Global agriculture and carbon trade-offs. *Proceedings of the National Academy Sciences of the United States of America*. 111(34), 12342–12347. Doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1412835111>
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on the global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623-1627.

- Lara, B. D., Gandini, M. L., Matteucci, S. D., y Scaramuzzino, R. L. (2019). Cambios en el funcionamiento de los ecosistemas de la región pampeana en los últimos 20 años: indicios del impacto del cambio global. Asociación Argentina de Ecología de Paisajes; *Revista de la Asociación Argentina de Ecología de Paisajes*; 9; 1; 12-2019; 81-84. Recuperado de: <https://www.asadep.com.ar/l/cambios-en-el-funcionamiento-de-los-ecosistemas-de-l>
- Leavy, S., y Allen, B. (2015). Comercialización de soja en la últimas dos décadas: mercado disponible vs. mercado de futuros. *Ciencias Agronómicas / Universidad Nacional de Rosario* 28 (16) : 45-52. Recuperado de: <http://www.cienciasagronomicas.unr.edu.ar/journal/index.php/agronom/article/view/173/186>
- Lefèvre, C., Rekik, F., Alcantara, V., y Wiese, L. (2017). *Soil organic carbon: the hidden potential*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Maceira, N. O., Martiarena, D. A., Rizzalli, R. H., Jaimes, F., Castaño, J. A., Quiñones Martorello, A. y Thougnon-Islas, A. J. (2020). Unidad demostrativa agroecológica Balcarce (UDAB). *Fortaleciendo capacidades para una agricultura sostenible. En: Aportes para el ordenamiento territorial de Argentina: estudios de casos y experiencias en marcha*, 208-215. Giobellina, B., Murillo, N. y Celiz, Y. (Compiladoras). 1a ed. Ediciones INTA.
- Modernel, P., Rossing, W. A., Corbeels, M., Dogliotti, S., Picasso, V., y Tiftonell, P. (2016). Land use change and ecosystem service provision in Pampas and Campos grasslands of southern South America. *Environmental Research Letters*, 11(11), 113002.
- Mukumbuta, I. y Hatano, R. (2020) Do tillage and conversion of grassland to cropland always deplete soil organic carbon? *Soil Science and Plant Nutrition*, 66(1), 76-83, DOI: [10.1080/00380768.2019.1676135](https://doi.org/10.1080/00380768.2019.1676135)
- Newell, P., Pattberg, P., y Schroeder, H. (2012). Multiactor governance and the environment. *Annual review of environment and resources*, 365–387. Vol. 37. Doi: [10.1146/annurev-environ-020911-094659](https://doi.org/10.1146/annurev-environ-020911-094659)
- Pabst, H., F. Gerschlauser, R. Kiese, y Y. Kuzyakov. (2016). Land Use and Precipitation Affect Organic and Microbial Carbon Stocks and the Specific Metabolic Quotient in Soils of Eleven Ecosystems of Mt.

- Kilimanjaro, Tanzania. *Land Degradation and Development*, 27 (3), 592–602. Doi: [10.1002/ldr.2406](https://doi.org/10.1002/ldr.2406).
- Papagno, S. G. y Vitale, J. (2019). IX. La dimensión de futuro en el desarrollo territorial rural frente a los desafíos de la Agenda 2030. En: Cuervo, L. M. y Délano, M del P (Eds.) *Planificación multiescalar: ordenamiento, prospectiva territorial y liderazgos públicos*, 169-182. Volumen III. Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- Pereira, P., Bogunovic, I., Muñoz-Rojas, M., y Brevik, E. C. (2018). Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 5, 7-13.
- Pengue, W. (2014). Cambios y escenarios en la agricultura argentina del Siglo XXI. Buenos Aires: GEPAMA, 49 p.
- Pengue, W. y Rodríguez, A. (2018). Las Transformaciones Urbano-Rurales en la Argentina: conflictos, consecuencias y alternativas en los albores del milenio. En: Pengue, W. y Rodríguez, A. (Editores) *Agroecología, Ambiente y Salud: Escudos Verdes Productivos y Pueblos Sustentables*, 13-31. Fundación Heinrich Böll, Oficina Regional para Cono Sur.
- Pries, C. E. H., Castanha, C., Porras, R. C., y Torn, M. S. (2017). The whole-soil carbon flux in response to warming. *Science*, 355(6332), 1420-1423.
- Powelson, D. S., Gregory, P. J., Whalley, W. R., Quinton, J. N., Hopkins, D. W., Whitmore, A. P. y Goulding, K. W. (2011). Soil management in relation to sustainable agriculture and ecosystem services. *Food policy*, 36 (1), S72-S87. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2010.11.025>
- Sánchez, R. y Zulaica, L. (2002). Ordenamiento morfoedáfico de los sistemas ecológico-paisajísticos del Partido de Tandil (Provincia de Buenos Aires). *Congreso Nacional de Geografía. 63 Semana de Geografía*, 63, 387-402. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=15427544>.
- Sarandón, S. J. (2020). Agrobiodiversidad, su rol en una agricultura sustentable. En: *Biodiversidad, agroecología y agricultura sustentable*, 13-36. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. Doi: <https://doi.org/10.35537/10915/109141>.

- Satorre, E. H. y Slafer, G. A. (1999). *Wheat: Ecology and Physiology of Yield Determination*. Food Products Press New York, USA: 503.
- Sequeira, N., Vazquez, P., Sacido, M. (2021). Efectos de la agriculturización sobre la extracción de nutrientes en la Región Pampeana Argentina. el caso del N y P en el partido de Benito Juárez. *Revista Geoambiente On-line*, 40, 1 -22.
- Somoza, A., Vazquez, P. S y Zulaica, L. (2019). Implementación de Buenas Prácticas Agrícolas para la gestión ambiental rural. *Revista de Investigaciones Agropecuarias RIA*, 44(3), 398-423.
- Somoza, A., Vazquez, P. S, Zulaica, L. y Sacido, M. (2020). Dinámica espacio-temporal de usos del suelo en sistemas ecológicos de la región pampeana austral, Argentina. *Agriculturización en el partido de Tandil. M+ A, revista electrónica de medioambiente*, 21(1), 82-101.
- Somoza, A., Vazquez, P. S, Zulaica, L. y Sacido, M. (2021). Zonificación agroecológica del partido de Tandil (Argentina): aportes para gestión de servicios ecosistémicos. *Cadernos de Geografía*, (43), 107-126. Doi: [https://dx.doi.org/10.14195/0871-1623\\_43\\_8](https://dx.doi.org/10.14195/0871-1623_43_8)
- Somoza, A. y Vazquez, P. (2022). Adopción del agronegocio y estrategias para el ordenamiento ambiental territorial: Unidades de agriculturización y unidades ambientales en el partido de Tandil, Región Pampeana Argentina. *Revista Ciencias Agronómicas*, (39), e018-e018. DOI: <https://doi.org/10.35305/agro39.e018>.
- Stockmann, U., Adams, M. A., Crawford, J. W., Field, D. J., Henkaarchi, N., Jenkins, M. y Zimmermann, M. (2013). The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 164, 80-99.
- Vazquez, P. y Zulaica L. (2011). Cambios en el uso de la tierra del Partido de Tandil y principales impactos ambientales. *Revista Párrafos Geográficos*, 10, (2), 242-267.
- Vazquez, P. y Zulaica, L. (2012). Transformaciones agroproductivas e indicadores de sustentabilidad en el Partido de Tandil (Provincia de Buenos Aires) durante los periodos 1988-2002 y 2002-2010. *Revista CAMPO-TERRITÓRIO: revista de Geografía Agraria*, 7, (13), 5-39.
- Vazquez, P.; Sacido, M. y Zulaica, L. (2012a). Transformaciones agroproductivas e indicadores de sustentabilidad en la Cuenca del río Quequén Grande (Provincia de Buenos Aires, Argentina) durante los

- periodos 1988-1998 y 1998-2008. *Revista Cuadernos Geográficos de la Universidad de Granada*, 50, 88-119.
- Vazquez, P.; Sacido, M. y Zulaica, L. (2012b). Técnicas de análisis para el ordenamiento territorial de cuencas agropecuarias: Aplicaciones en la Pampa Austral, Argentina. *Scripta Nova*, XVI, 1–19, <http://www.ub.edu/geocrit/sn/sn-392.htm>.
- Vazquez, P., Zulaica, L. y Requesens, E. (2016). Análisis ambiental de los cambios en el uso de las tierras en el partido de Azul (Centro Bonaerense). *Revista Agriscientia*, 33, (1), 1-12. <http://www.agriscientia.unc.edu.ar/volumenes/>.
- Vazquez, P., Zulaica, L. y Sequeira, N. (2017). Tasas de cambio de uso del suelo y agriculturización en el partido de Lobería, Argentina. *Revista de Investigaciones de la Facultad de Ciencias Agrarias – UNR*, 17, 39, 28-36.
- Vazquez, P., Zulaica, L.; Sequeira N. y Daga, D. (2019a). Expansión agrícola y potenciales implicancias sobre los servicios ecosistémicos en los paisajes del partido de Necochea, Buenos Aires, Argentina. *Acta Geográfica*, 13,(31), 171- 196.
- Vazquez P., Zulaica, L. y Somoza, A. (2019b). Agriculturización, impactos ambientales y zonificación ecológica en el partido de Tres arroyos (Provincia de Buenos Aires, Argentina). Período 2002-2017. *Geografía e Ordenamento do Território*, 18, 209-232.
- Vazquez, P., Zulaica, L. y Somoza, A. (2019c). Tasas de cambio de uso del suelo y agriculturización en el partido de Tandil, Argentina. *Geoambiente on-line*. 34. 66-86
- Vazquez, P., Sacido, M. y Ruiz Gonzales, D. (2020). Riesgos Ambientales. Partido de Tres Arroyos. Región Pampeana Austral. Argentina. *Raega - O Espaço Geográfico em Análise*, 1(4), 49-66.
- Viglizzo, E. F., Frank, F. C., Carreño, L.V., Jobbagys, E.G., Pereyra, E., Clatt, J., Pincen, D. y Ricard, F. (2011). Ecological and environmental footprints of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Global Change Biology*, 17, 959-973.
- Viglizzo, E. F. (2018). Cambio climático y seguridad alimentaria global: Oportunidades y amenazas para el sector rural argentino. *Anales de la ANAV*, 69, 1-32.

- Villarino, S. H., Studdert, G. A., Laterra, P., y Cendoya, M. G. (2014). Agricultural impact on soil organic carbon content: Testing the IPCC carbon accounting method for evaluations at county scale. *Agriculture, ecosystems & environment*, 185, 118-132.
- Zomer, R. J., Bossio, D. A., Sommer, R. y Verchot, L. V. (2017). Global sequestration potential of increased organic carbon in cropland soils. *Scientific Reports*, 7(1), 1-8. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15794-8>