



Adaptación de la agricultura en la región semiárida pampeana: su evolución reciente y proyección futura

Adaptation of Agriculture in the Semiarid Pampas Region: Recent Evolution and Future

Martín Díaz-Zorita¹

¹Area de Producción Vegetal, Facultad de Agronomía Universidad Nacional de La Pampa (UNLPam), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Santa Rosa (La Pampa), Argentina. ORCID 0000-0003-3260-360X

Conferencia dictada al recibir el Premio Bolsa de Cereales el 14 de noviembre de 2024.

Autor para correspondencia:
Correo electrónico: mdzorita@agro.unlpam.edu.ar

Resumen

En el centro-sur de la región semiárida pampeana, la agricultura extensiva enfrenta condiciones adversas como déficits hídricos frecuentes y suelos frágiles, pobres en materia orgánica. Prácticas como la captación de agua, el mantenimiento de rastrojos y la conservación de materia orgánica han mejorado los rendimientos, pero la degradación del suelo sigue siendo una amenaza para la producción. Desde mediados de la década de 1980, la superficie cultivada y el uso de tecnología han aumentado, especialmente en el centro-norte y este de La Pampa, donde los suelos son más profundos y las lluvias más frecuentes. Sin embargo, el uso del suelo no supera el 67 % anual, con escasa cobertura invernal, lo que incrementa el riesgo de erosión eólica. El crecimiento sustentable requiere mejorar la fertilización y adoptar cultivos de cobertura invernal para proteger el suelo. La incorporación de fertilizantes en el momento adecuado y el ajuste de dosis optimizan el uso del agua y los nutrientes. La clave para una agricultura exitosa en esta región de clima incierto y suelos vulnerables es mantener suelos protegidos, raíces activas y una nutrición adecuada de los cultivos, priorizando la siembra oportuna de variedades adaptadas para conservar la estabilidad del suelo.

Palabras clave: Agricultura de secano, manejo de cultivos, fertilización, materia orgánica, eficiencia de uso del agua.

Abstract

In the south-central area of the semi-arid Pampas region, extensive agriculture faces adverse conditions such as frequent water deficits and fragile soils with low organic matter. Practices like rainwater harvesting, residue retention, and organic matter conservation have improved yields, but soil degradation remains a persistent threat to production. Since the mid-1980s, cultivated areas and the use of advanced technology have increased, particularly in the central-northern and eastern parts of La Pampa, where soils are deeper, and rainfall is more frequent. However, land use does not exceed 67% annually, with insufficient winter cover, increasing the risk of wind erosion. Sustainable growth requires improving fertilization and adopting winter cover crops to protect the soil. Applying fertilizers at the right time and adjusting doses optimize water and nutrient use. The key to successful agriculture in this region, marked by an unpredictable climate and fragile soils, is maintaining protected soils, active roots, and proper crop nutrition, while prioritizing the timely planting of adapted varieties to preserve soil stability.

Keywords: Dryland agriculture, crop management, fertilization, soil organic matter, water use efficiency

Introducción

Las regiones semiáridas se caracterizan por condiciones ambientales complejas y desafiantes para el crecimiento de las plantas dadas principalmente por alta evapotranspiración potencial durante la mayor parte del año y aportes de lluvias frecuentemente escasos y erráticos (Sombroek y Sene, 1993; Rathore *et al.* 2019). Estas condiciones conducen a frecuentes períodos de sequía por lo que su resultado sobre el crecimiento de las plantas se relaciona con la capacidad de almacenamiento de agua de los suelos y la ocurrencia del fenómeno con relación al ciclo vegetativo anual (Valiente, 2001). Es así que en estas regiones una de las amenazas más importantes a la producción de los cultivos es la degradación de los suelos que al disminuir su capacidad de almacenar agua y nutrientes conduce a reducir la productividad del agua (Cantero-Martínez *et al.* 2010). En Argentina, la región semiárida se extiende de norte a sur entre las regiones áridas del oeste y húmedas hacia el este (Fig. 1). La porción central y sur se encuentra al oeste del sector núcleo de producción agropecuaria extensiva de secano de la Argentina comprendiendo gran parte de la provincia de Córdoba, el este de las de San Luis y de La Pampa y el oeste de la de Buenos Aires.



Figura 1: Ubicación de la región semiárida en la Argentina según Kugler (1955). Las líneas punteadas muestran límites políticos interprovinciales y entre los distritos dentro de estas.

En el centro sur de la región semiárida pampeana, los antecedentes de prácticas agrícolas extensivas se remontan a finales del siglo XIX. Hacia mediados de la década de 1920, sólo en la provincia de La Pampa, se alcanzó una superficie cultivada de trigo (*Triticum aestivum* L.) de aproximadamente un millón de hectáreas (Martocci, 2014). En ese entonces ya se describía a la región de la Pampa como una región agrícola de riesgo con alta frecuencia de condiciones desfavorables para la producción. Por ejemplo, el botánico Juan Monticelli en sus registros fitogeográficos de expediciones en el este del Territorio de La Pampa entre 1928 y 1932 consideraba que “...la región de la Pampa, no debe ser considerada como región agrícola segura, y no debe esperar cambios rítmicos o geológicos de su clima;

es engañar al colono prestarle semillas, si por año de ilusión optimista deberá pagar nueve de desastres” (Massa, 1967). Esta condición desafiante para la producción agrícola de secano asociada a la dureza de las tierras sin laboreo, a la rigurosidad del viento y a la escasez de las lluvias fue validada por otros observadores de la región (Martocci, 2014). Ante la conjunción de restricciones a los rendimientos, el uso intenso y frecuente de laboreos y las escasas precipitaciones con intensos vientos gran parte del sector central y sur de la región semiárida pampeana fue afectado con niveles severos a muy severos de erosión eólica hacia finales de la década de 1930 (Instituto de Suelos y Agrotecnia, 1948).

Las características edafoclimáticas descriptas al inicio del siglo XX durante la expansión agrícola en el centro sur de la región semiárida pampeana siguen presentes y perduran como así también las amenazas a la producción y a la sustentabilidad de las actividades agropecuarias. El identificar decisiones de manejo que explican aumentos recientes en la producción agropecuaria permitiría mejorar el diseño de estrategias para preservar y mejorar las actividades agrícolas y evitar la pérdida de productividad del agua en esta región naturalmente vulnerable. Es propósito de este escrito, describir la evolución reciente de la agricultura en la región semiárida productiva de la provincia de La Pampa. Así también, analizar el papel de factores tecnológicos y ambientales que acompañan al sostenimiento de la producción de cultivos anuales procurando discernir entre el crecimiento en la producción agropecuaria como resultado de la expansión o de la adaptación de específicas prácticas de cultivo.

El clima y los suelos en la región semiárida pampeana

La región semiárida agrícola y productiva de la provincia de La Pampa se extiende mayormente hacia el centro y el este de esta y se caracteriza por presentar un clima templado continental con gran amplitud térmica anual (Fig. 2). Las fechas de ocurrencia de las primeras y últimas heladas es variable resultando en periodos libres de heladas de entre 163 y 220 días (Mendez *et al.* 2023). Además, es consistente la tendencia a aumentar las temperaturas mínimas y máximas estivales que, además de incrementar la demanda atmosférica de agua aceleran el desarrollo de las plantas y reduce su eficiencia de uso de la radiación resultando en menor crecimiento.

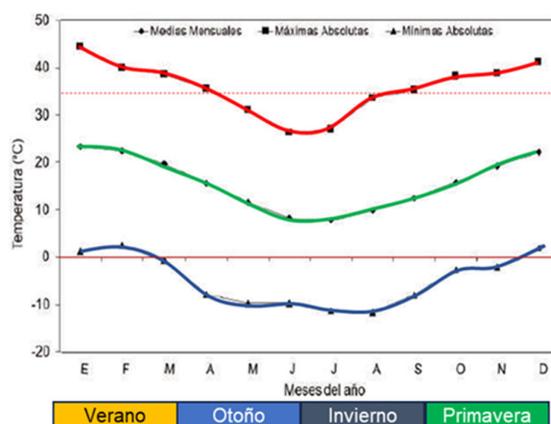


Figura 2: Temperaturas mensuales del aire en Santa Rosa (La Pampa, Argentina) registradas en la estación agrometeorológica de la FA UNLPam. Promedio entre 1977 y 2021. Elaborado a partir de Vergara *et al.* 2022.

Las precipitaciones, en promedio próximas a los 700 mm anuales, disminuyen de este a oeste y ocurren principalmente entre la primavera y el otoño. Los aportes de lluvias durante el invierno son prácticamente insignificantes y, en las recientes décadas, se demora el inicio del régimen húmedo primaveral con una significativa reducción en su magnitud comparada con su promedio histórico. Además, la acción negativa de los vientos, más frecuentes e intensos durante la primavera, aumentan las deficiencias hídricas y se limita la productividad de los cultivos (Casagrande y Conti, 1980). El balance hídrico durante el verano es negativo (Fig. 3) y ante la creciente disminución en la humedad relativa se observa constante aumento en la demanda hídrica entre 1988 y 2019 a razón de entre 9,9 y 17,7 mm año⁻¹ (Bazan Azargado *et al.* 2024).

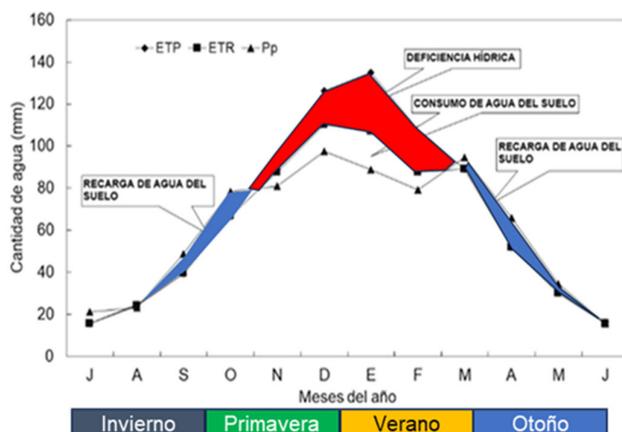


Figura 3: Balance hídrico medio mensual en Santa Rosa (La Pampa, Argentina) según registros en la estación agrometeorológicas de la FA UNLPam. Promedio entre 1977 y 2021. ETP: Evapotranspiración potencial, ETR: Evapotranspiración real; Pp: Precipitaciones. Elaborado a partir de Vergara *et al.* 2022.

Los suelos predominantes han sido clasificados como molisoles con materiales de origen eólico, fácilmente transportables por el viento y consecuente alta susceptibilidad a la erosión eólica (Díaz-Zorita y Buschiazzo, 2006a). La textura superficial varía de arenosa en el sudoeste de la región, areno franca a franco arenosa en el centro a franco limosa hacia el noreste. La topografía predominante en el sector centro sur de la región semiárida pampeana es mayormente plana con moderadas ondulaciones intercalando cadenas medanosas y sectores alargados, de acumulación hídrica mayormente temporal. Si bien en predominan suelos profundos, hacia el centro y sudeste de la región es frecuente la presencia de una costra calcárea (tosca) que limita la profundidad de los suelos entre pocos centímetros a algunos metros (Buschiazzo, 1986). En estos casos, el desarrollo del horizonte A y la cantidad de agua acumulada en el perfil es mayor cuanto mayor es el espesor efectivo del perfil hasta la tosca mostrando frecuentes limitaciones al crecimiento de las plantas excepto en ciclos con excesos de precipitaciones con respecto a las históricas de la región (Furch *et al.* 1993).

En toda esta área la proporción de arcillas y los contenidos de materia orgánica son bajos afectando la estabilidad de la estructura, la capacidad de retención y almacenamiento de agua de los suelos y su fertilidad. Estas características, en combinación con las condiciones climáticas limitan el normal crecimiento de los cultivos. Por ejemplo, independientemente del balance hídrico medio durante el ciclo productivo de trigo, los rendimientos aumentan linealmente al aumentar los contenidos de materia orgánica en el horizonte superficial hasta niveles de aproximadamente 2,9 % (Fig. 4). La pérdida de

productividad de trigo alcanza unos 70 kg ha⁻¹ por cada tonelada de carbono perdida de la capa superficial de suelos de la región semiárida pampeana (Díaz-Zorita *et al.* 1999). La diferencia entre los contenidos actuales de carbono en los suelos y su capacidad potencial de almacenarlo, convirtiendo a los suelos en destino de este elemento, es una oportunidad para promover la adopción de prácticas sustentables de manejo de los suelos (Lal, 2019). La región pampeana, dado el deterioro de sus suelos por laboreo intensivo y significativas pérdidas de carbono, es uno de los mayores destinos potenciales para el secuestro de carbono (Díaz-Zorita y Buschiazzo, 2006b). Este objetivo puede lograrse al adoptarse prácticas recomendadas de manejo tales como rotaciones de cultivos basadas en cereales y el uso intensivo de fertilizantes.

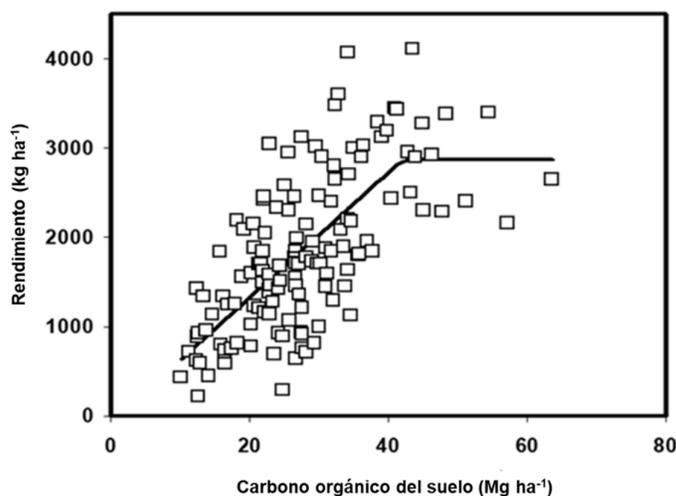


Figura 4: Rendimientos de trigo según contenidos de carbono orgánico del suelo en la capa de 0 a 20 cm en 134 sitios de producción en el centro de la región semiárida pampeana (Díaz-Zorita *et al.* 1999).

El área norte y noreste, donde el relieve es mayormente plano, predominan sitios con mayor aptitud para prácticas agrícolas sobre suelos principalmente arenosos profundos y con bajo el riesgo de generarse procesos de erosión hídrica. Sin embargo, bajo condiciones hídricas positivas es mayor la ocurrencia inundaciones en posiciones deprimidas del paisaje y el ascenso del nivel de agua freática, mayormente con alto contenido salino, que afectan negativamente la calidad de los suelos principalmente por salinización en los períodos posteriores más secos (Buschiazzo *et al.* 2015). Este escenario fue ocurrido durante la década de 1980 cuando las precipitaciones aumentaron en algo más del 33 % comparadas con los registros medios históricos y principalmente entre octubre y marzo (Casagrande y Vergara, 1996). La superficie con estos suelos con reducido potencial productivo natural por presencia de agua freática próxima a la superficie es menor al 10% del área y se concentra en pequeños sectores del terreno. Otros suelos, también en posiciones deprimidas del relieve de la zona centro este de la provincia sin influencia de agua freática próxima a la superficie no son genéticamente salinos y muestran mayor productividad por presentar balances hídricos favorables, mayor desarrollo del horizonte A y altos contenidos de materia orgánica. Luego de anegamientos durante períodos lluviosos los espejos de agua se evaporan y se observan acumulaciones de sales con procesos de salinización que pueden revertirse paulatinamente con los cultivos (Buschiazzo *et al.* 2015).

En el este de la provincia de La Pampa son mayores los riesgos de erosión eólica asociados con el predominio de suelos arenosos y de frágil estructuración en combinación con periodos sin cobertura ni rugosidad superficial. El momento de mayor exposición y riesgo a procesos de erosión eólica es durante el fin del invierno y el inicio de la primavera coincidente con el barbecho y la siembra de cultivos de verano. En los departamentos Chapaleufú, Maracó, Quemú Quemú y Realicó, aun cuando las condiciones climáticas son las más húmedas de la región, entre el 50 y el 90 % de su superficie presenta suelos altamente susceptibles a erosionarse por el viento dado por la textura arenosa, bajos contenidos de materia orgánica en el horizonte superficial y frágil estructuración.

En el centro sur de la región semiárida pampeana, suelos conteniendo más del 30 % de materiales finos (limo y arcilla) y menos del 3 % de materia orgánica son altamente susceptibles a compactarse. En cambio, si los contenidos de materia orgánica superan el 3 % o la textura es arenosa su riesgo de compactación es menor. Los Haplustoles, principalmente degradados con pérdida de materia orgánica por laboreo muestran alta susceptibilidad a la compactación (Buschiazzo, 2006). El manejo intensivo de los suelos, principalmente bajo laboreo, redujo los contenidos de materia orgánica, su agregación y condujo a la formación de compactaciones aumentando así los riesgos de escurrimiento del agua de lluvia (Buschiazzo *et al.* 2015).

En esta región conviven condiciones de excesos hídricos que conducen a inundaciones temporales y de deficiencias en precipitaciones que resultan en la prolongación de los periodos estacionales de sequias reduciendo la productividad de pasturas y cultivos. Estos fenómenos son frecuentes y en muchos casos simultáneos tal como lo reflejan los 51 decretos de emergencia o de desastre agropecuario por sequia o inundación declarados en 20 años (Real Ortellado, 2020). Estudios regionales describen que las precipitaciones cubren en mayor proporción el uso consuntivo del agua para la producción de trigo, maíz (*Zea mays* L.) y girasol (*Helianthus annuus* L.) que los aportes del agua del suelo (Bono *et al.* 2017). Sin embargo, en suelos sin presencia de agua freática próxima a la superficie o salinidad, las variaciones en los rendimientos agrícolas de cultivos de invierno o de verano se explican estrecha y positivamente con la cantidad de agua disponible en el momento de sembrar (Fig. 5). El manejo del agua desde su captación, almacenaje y consumo durante el ciclo de crecimiento de cultivos es un elemento clave que condiciona la producción agropecuaria en La Pampa y requiere de constante atención e integración en los planteos de secuencias de cultivos y decisiones para el manejo productivo de estos.

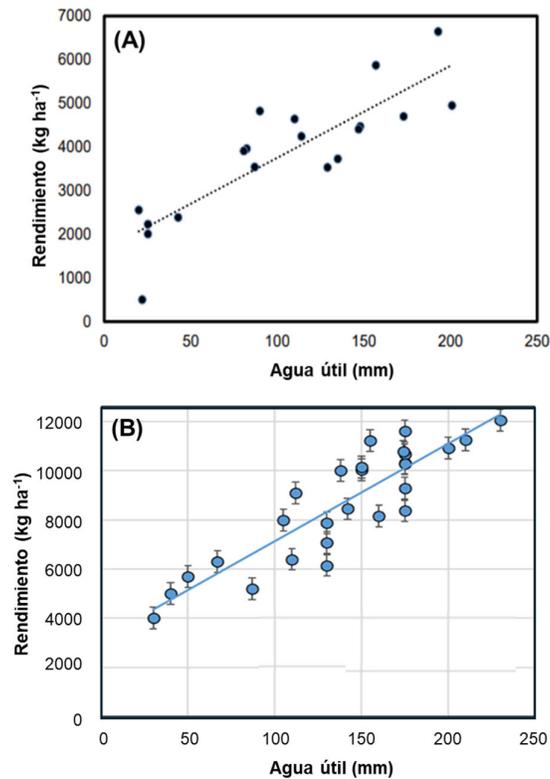


Figura 5: Relaciones entre los rendimientos de trigo (A) y de maíz (B) y los contenidos de agua útil hasta 120 cm de profundidad evaluada en el momento de la siembra de lotes de producción de la región semiárida pampeana. (A) Alvarez, 2020; (B) Alvarez *et al.* (2020).

Uso de la tierra y producción agrícola en La Pampa

La producción de granos en la Argentina desde mediados de la década del sesenta en el siglo pasado hasta el presente aumentó seis veces respondiendo a cambios en el uso de la tierra, en la importancia relativa de los cultivos y a la implementación de diversas tecnologías para su manejo. La producción total de granos en la provincia de La Pampa aporta en promedio el 4 % del total de la producción nacional con diferentes comportamientos en las contribuciones entre cultivos de invierno y de ciclo estival. Los cultivos de invierno, mayormente trigo, aportan en forma relativamente estable desde los últimos 50 años aproximadamente 500.000 toneladas anuales de granos, principalmente trigo, con una significativa reducción en sus aportes a la producción nacional a partir de mediados de la década de 1990 cuando de casi del 7 % se redujo a algo más del 4 % (Fig. 6). En contraposición, la producción de maíz, de soja [*Glycine max* (L.) Merrill], de girasol y de sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] aumenta desde inicios de la década de 1980 y en mayor magnitud principalmente desde mediados de la primera década del este siglo. Aun así, los aportes relativos de la producción de estos cultivos estivales a la producción nacional son prácticamente estables y varían entre el 3 y el 4 % del total (Fig. 6).

En parte, el aumento en la producción agrícola en la Argentina se explica por la conjunción entre la adopción de tecnologías y la expansión de la frontera agropecuaria (Rabinovich y Torres, 2004). Sin embargo, en la provincia de La Pampa la mayor superficie bajo cultivos anuales de cosecha no se explica por el desplazamiento de la frontera agrícola hacia los márgenes oeste y sur de la región semiárida sino por la producción en áreas bajo pastizales o pasturas implantadas. El aumento de los cultivos anuales de granos responde, entre otros factores, al aumento de las precipitaciones ampliando en aproximadamente 150 km hacia el oeste la isohieta de 600 mm (Roberto *et al.* 1994).

La superficie agrícola representa aproximadamente el 5 % del área nacional bajo cultivos y, tal como en el resto del país, muestra contrastes en su evolución entre cultivo de invierno o de verano. Las siembras invernales se redujeron prácticamente a su mitad entre 1995 y 2015 representando en la actualidad algo menos de 450.000 has de cultivo (Fig. 7). Las siembras de verano prácticamente se triplicaron entre inicios de la década de 1980 hasta el presente alcanzado casi 1.300.000 has en el quinquenio 2017-2023 (Fig. 7).

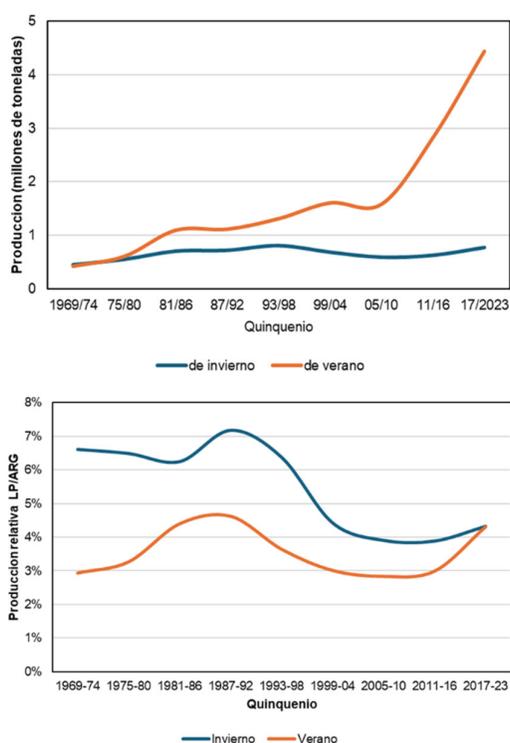


Figura 6: Evolución por quinquenios de la producción agrícola en la provincia de La Pampa (LP) y contribución relativa a la producción argentina (ARG). Elaboración propia con datos de series históricas de estimaciones agrícolas del Ministerio de Economía (2024) en: <https://datosestimaciones.magyp.gob.ar/> (último acceso Octubre 2024). Cultivos de invierno: trigo, cultivos de verano: maíz, sorgo, girasol y soja.

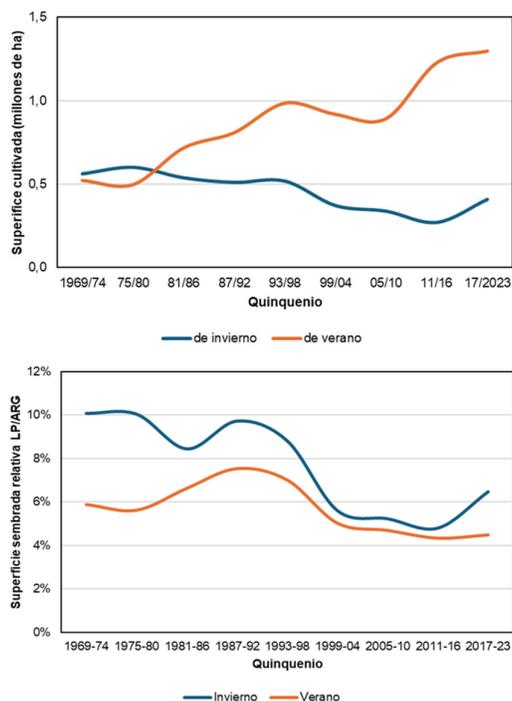


Figura 7: Evolución por quinquenios de la superficie con cultivos anuales en la provincia de La Pampa (LP) y su participación relativa al área agrícola argentina (ARG). Elaboración propia con datos de series históricas de estimaciones agrícolas del Ministerio de Economía (2024) en: <https://datosestimaciones.magyp.gob.ar/> (último acceso Octubre 2024). Cultivos de invierno: trigo, cultivos de verano: maíz, sorgo, girasol y soja.

Según un estudio descripto por Frank (2023) al analizar los efectos del cambio climático y la producción agropecuaria en la región central no hay evidencias de aumentos en el área con cultivos por fuera de la región central y bajo prácticas agrícolas desde inicios del siglo pasado. Este mismo estudio describe el crecimiento en la densidad de área con cultivos anuales principalmente hacia el noreste de la provincia de La Pampa.

En la actualidad casi el 50 % del área productiva de la región semiárida pampeana en la provincia de La Pampa se encuentra anualmente bajo cultivos con diferentes características edafoclimáticas. Con la finalidad de analizar la adaptación y desafíos de la agricultura en la región expuesto en este escrito se identifican tres sectores contrastantes que conducen a diferentes niveles de productividad y de riesgo en los planteos de producción agropecuaria (Fig.8). Hacia el este de la región (departamentos de Chapaleufú, Maraco, Quemú Quemú y Catrilo) la superficie cultivada media es próxima al 66 % de las casi 930.000 has cultivables mientras que en el sector centro sur (departamentos de Atreucó, Guatraché, Hucal, Toay, Utracán y Capital), sobre unas 1.300.000 has cultivables las siembras anuales se extienden en algo menos del 40 % de la superficie. Una situación intermedia se describe en el área centro norte de la provincia comprendida por los departamentos de Conhelo, Trenal, Realicó y Rancul (Tabla 1).

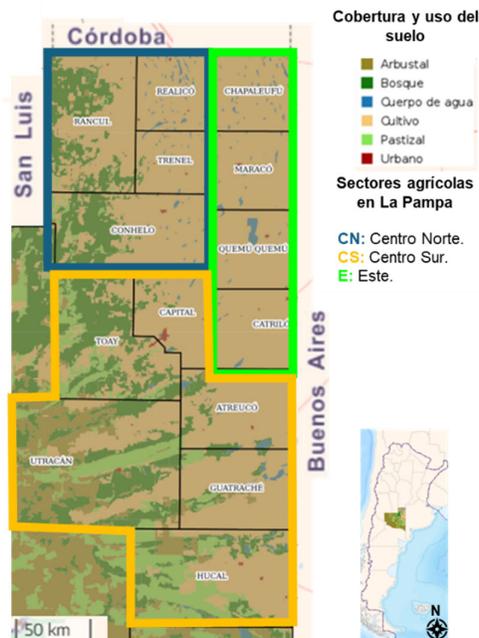


Figura 8: Mapa de cobertura y uso del suelo en la provincia de La Pampa (IDELP, 2018) y ubicación de áreas con características edafoclimáticas contrastantes para la agricultura.

Tabla 1: Área cultivable potencial y uso actual agrícola actual en la provincia de La Pampa según sectores descriptos en la figura 8. Elaboración propia con datos de la Dirección de Agricultura del Ministerio de la Producción de la provincia de La Pampa y de series históricas de estimaciones agrícolas del Ministerio de Economía (2024) en: <https://datosestimaciones.magyp.gob.ar/> (último acceso Octubre 2024).

Superficie (ha)	Sector en la provincia de La Pampa			Total
	Centro Norte	Centro Sur	Este	
Total	1.402.885	3.332.517	999.928	5.735.330
Cultivable	904.188 (64%)	1.266.620 (38%)	928.843 (93%)	3.099.651 (54%)
Cultivada media (2017-23)	526.409 (58 %)	486.542 (38 %)	612.680 (66 %)	1.625.635 (52 %)
Cultivada máxima (2017-23)	698.460 (77 %)	688.700 (54 %)	757.402 (82 %)	2.144.562 (69 %)

En la región pampeana el crecimiento en la producción de granos se asocia inicialmente con la incorporación de nuevas áreas bajo cultivos (Viglizzo *et al.* 2002) y a partir de la década de 1980 es mayormente explicado por el uso intensivo de insumos (Viglizzo *et al.* 2010). En toda el área de producción de cultivos de la provincia de La Pampa la adopción de tecnologías es creciente con una mayor proporción de planteos con nivel tecnológico medio a alto hacia el norte y el este de la región (Tabla 2). El nivel tecnológico es un concepto amplio que incluye la utilización de insumos y la implementación de prácticas de manejo empleadas en cada cultivo. La superficie bajo agricultura en siembra directa es relativamente estable y se extiende en sobre algo más del 85 % del sector centro-norte y este y casi el 65 % en el centro-sur de la región. El uso de fertilizantes en todos los cultivos es creciente en ambos sectores observándose dosis aplicadas aproximadamente 35 % mayores hacia el centro-norte y este. Las densidades de siembra no manifiestan cambios medios relevantes en el sector centro-norte y este de La Pampa pero tiende a disminuir, en todos los cultivos del centro sur (Bolsa de Cereales, 2024).

Tabla 2: Cambios en el porcentaje del área cultivada con alto nivel tecnológico para el manejo agrícolas en la provincia de La Pampa. Adaptado de informes y datos del Relevamiento de Tecnología Agrícola Aplicada de la Bolsa de Cereales en: <https://www.bolsadecereales.com/tecnologia-informes> (último acceso Octubre 2024).

Cultivo	Sector de la provincia de La Pampa			
	Centro Norte y Este		Centro Sur	
	Anterior al 2014	Posterior al 2018	Anterior al 2014	Posterior al 2018
Trigo	33	42	21	20
Maíz de siembra en primavera temprana	55	59	29	45
Maíz de siembra en primavera tardía	51	57	29	30
Soja	34	39	5	24
Girasol	38	40	37	28
Sorgo	3	6	0	17
Promedio	36	41	20	27

Tabla 3: Densidad promedio de siembra (semillas m⁻²) de cultivos anuales en la provincia de La Pampa. Elaboración propia con datos de bases de datos agrícolas de AACREA e información calificada de profesionales del CIALP y de APALP (última consulta en Octubre 2024).

Cultivo	Sector en la provincia de La Pampa		
	Centro Norte	Centro Sur	Este
Trigo	269,9	203,5	276,1
Maíz de siembra en primavera temprana	4,2	2,3	6,3
Maíz de siembra en primavera tardía	4,1	3,9	5,0
Soja de primera	38	30	35
Soja de segunda	39	30	38
Girasol	4,3	4,4	5,1

Ante el aumento en la adopción de tecnologías, los rendimientos medios de los cultivos fueron consistentemente mayores excepto en el caso del sorgo que estabilizó su productividad desde el quinquenio 1999-2004 (Fig. 9). En promedio, el progreso productivo anual de los cultivos en el centro de la región semiárida pampeana es a razón de entre el 1 y el 2 % de los rendimientos máximos alcanzados regionalmente y en promedio similares al progreso medio de rendimientos en Argentina (Tabla 4). Este aumento anual de rendimientos fue mayor hacia el este de provincia de La Pampa y significativamente menor en el sector centro-sur sugiriendo que parte de estas diferencias se deberían en general a la menor adopción de niveles tecnológicos altos hacia el sur de la región (Tabla 3). Además, en el norte las dosis fertilizantes fosfatados o nitrogenados y las densidades de siembra son mayores que hacia el sur de la región (Tabla 3).

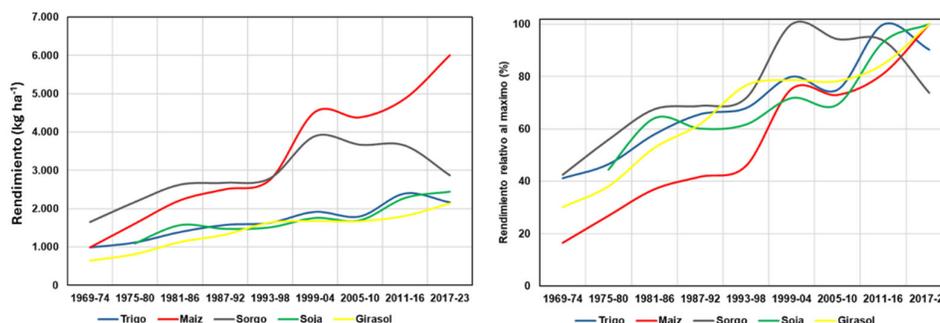


Figura 9: Evolución por quinquenios de los rendimientos medios de cultivos de cosecha y relativos a su productividad máxima en la provincia de La Pampa. Elaboración propia con datos de series históricas de estimaciones agrícolas del Ministerio de Economía (2024) en: <https://datosestimaciones.magyp.gob.ar/> (último acceso Octubre 2024).

Tabla 4: Progreso medio anual de rendimientos entre 1969 y 2023 ($\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) de cultivos anuales en la provincia de La Pampa y en la Argentina. Elaboración propia con datos de series históricas de estimaciones agrícolas del Ministerio de Economía (2024) en: <https://datosestimaciones.magyp.gob.ar/> (último acceso Octubre 2024).

Cultivo	Sector en la provincia de La Pampa			La Pampa	Argentina
	Centro Norte	Centro Sur	Este		
Trigo	32	28	38	32	38
Maíz	137	76	166	119	122
Sorgo	58	27	57	41	58
Soja	36	19	49	33	30
Girasol	33	30	41	34	32

Al integrar y proyectar estas decisiones agronómicas para el manejo de los cultivos de cosecha surgen interrogantes sobre los efectos inmediatos sobre la producción de los cultivos y sobre los sistemas agropecuarios regionales. La siembra directa de cultivos, tal como se observa en el resto de la región pampeana, es el modelo extensivo más habitual con contribuciones positivas para reducir procesos de degradación. En algunas áreas sensibles, tal es el caso del centro sur de la región semiárida pampeana los aportes sólo de la siembra bajo prácticas en labranza cero serían insuficiente para alcanzar objetivos de producción sostenible (Satorre y Andrade, 2021).

En el siguiente análisis se describen el papel de las secuencias de cultivos, del manejo de la cobertura de los suelos y de los aportes de la nutrición sobre la conservación del suelo y el crecimiento de las plantas en el contexto productivo actual en la región semiárida pampeana.

Secuencias de cultivos y cobertura de los suelos

La diversificación en las secuencias de cultivos de cosecha es una práctica con reconocidos aportes positivos sobre el crecimiento y la producción de las especies en rotación. Estudios de largo plazo bajo prácticas de labranza cero continuas desarrollados sobre Hapludoles énticos y típicos del oeste de la provincia de Buenos Aires validan esta observación (Díaz-Zorita *et al.* 2014). En promedio de 3 sitios y luego de 12 ciclos productivos los rendimientos medios de maíz en rotación con soja son en promedio 29 % superiores que bajo monocultivo y que en el caso de soja al rotar con maíz la producción se incrementa en aproximadamente el 5 % sobre el monocultivo de esta leguminosa (Fig. 10). La mayor producción lograda en cultivos en rotación es independiente de las condiciones de productividad o rendimientos medios y ocurren con gran frecuencia. En el caso de maíz casi en la totalidad de los años evaluados los rendimientos en rotación superaron a los cultivos sobre maíz y en el 64 % de los casos los rendimientos de soja en rotación fueron mayores que en monocultivo.

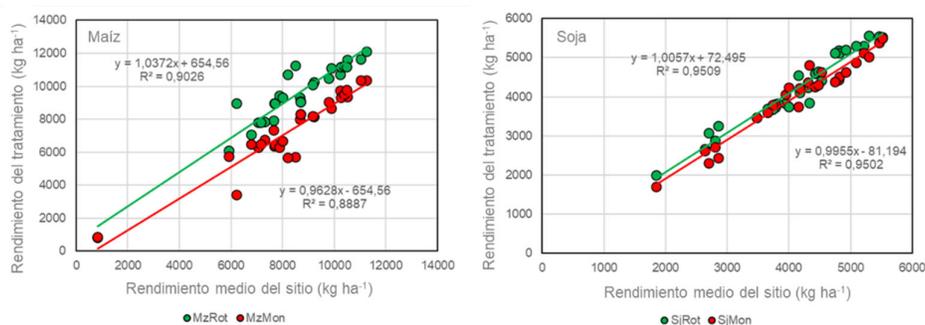


Figura 10: Rendimientos de maíz (Mz) y de soja (Sj) en rotación (Rot) y en monocultivo (Mon) en 3 sitios del oeste de la provincia de Buenos Aires conducidos por el grupo CREA “América” entre las campañas 2009/10 y 2021/22. Análisis y elaboración propia (resultados no publicados).

El manejo de la cobertura de los suelos a partir de la conservación de los rastrojos producidos en secuencias agrícolas del centro de la región semiárida pampeana también es un factor de relevancia para la producción agrícola. La remoción, o pérdida, de la cobertura de rastrojos reduce en promedio el 4 % los rendimientos de soja de primera y en el 15 % los rendimientos de maíz (Tabla 5). En el caso de trigo, este comportamiento tiene resultados variados asociados a restricciones a la implantación y crecimiento inicial de las plantas ante acumulaciones de residuos superiores a los 8 Mg ha⁻¹ que pueden limitar la formación de granos y los rendimientos (Barraco *et al.* 2007). Pero, en condiciones de adecuada implantación, al aumentar la cobertura de rastrojos permite mejorar la eficiencia en el uso del agua limitando las pérdidas por evaporación y logrando mayores rendimientos (Díaz-Zorita *et al.* 2023).

Quiroga *et al.* (2005) describieron que con bajos niveles de cobertura se reduce la eficiencia de almacenaje de agua durante el barbecho en suelos con capacidad de retención de agua de entre 90 y 210 mm hasta los 100 cm. Además, si se realizan laboreos con el propósito de reducir el riesgo de la acumulación abundante de rastrojos sobre la implantación y crecimiento vegetativo de trigo los efectos ocasionalmente benéficos sobre el rendimiento de trigo pueden afectar negativamente la capacidad de almacenar y administrar agua en cultivos de verano siguientes (Díaz-Zorita *et al.* 2004). Además de los efectos positivos sobre la reducción de la evaporación ante la conservación de residuos de cosecha, la mayor actividad biológica derivada de esta condición permite mejorar la estructura de los suelos observándose mayor tasa de infiltración en estos suelos (Fig. 11). Por lo tanto, la conservación de la cobertura de los suelos es una herramienta crítica para el sostenimiento de la producción de cultivos anuales de secano en la región.

Tabla 5: Rendimientos medios de cultivos en rotación en una secuencia según niveles de cobertura de suelos en siembra directa del centro de la región semiárida pampeana. Promedio de al menos 2 cultivos en una secuencia continua de 14 años. Letras diferentes en sentido horizontal indican diferencias significativas entre tratamientos de manejo de los rastrojos (Díaz-Zorita *et al.* 2018).

Cultivo	Manejo de rastrojos posterior a la cosecha		
	Control sin remoción	Reducido con remoción total	Duplicado
Soja	4252 a	4106 b	4342 a
Soja de segunda	2959 a	3053 a	3021 a
Trigo (con heladas)	4546 b	4992 a	4246 b
Trigo (sin heladas)	6151 a	6332 a	6785 b
Maíz	9191 a	8015 b	9377 a

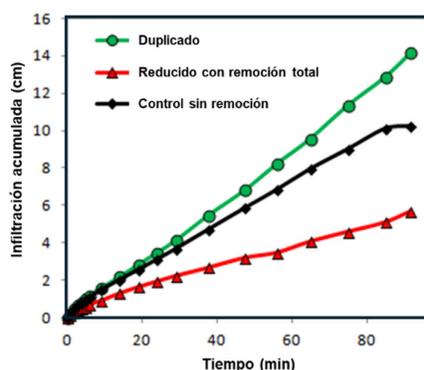


Figura 11: Infiltración acumulada en un Hapludol éntico luego de 14 años de una secuencia continua de cultivos en siembra directa según niveles de cobertura por manejo de rastrojos posterior a cada cosecha (Díaz-Zorita *et al.* 2018).

En la provincia de La Pampa, la superficie bajo cultivos anuales de cosecha es creciente desde inicios de la década de 1980 en el este y desde fines de la década del 2010 hacia el noroeste (Fig. 12). En el este y hacia el norte este aumento en el área agrícola conduce a una menor participación de pastizales y pasturas implantadas en las secuencias agropecuarias y ocurrió mayormente por la introducción de cultivos estivales. Estas observaciones coinciden con lo descrito por Vazquez y de Elorriaga (2024) que a través de la fotointerpretación de imágenes de la región describen que el área bajo barbechos de

duración mayor a los 6 meses aumentó 4 veces entre 1998 y 2006. Este aumento en la duración de los periodos bajo barbecho sin cobertura de suelos es un riesgo de deterioro de los suelos por la exposición a procesos de erosión eólica, el rápido afloramiento de agua freática con aportes salinos además de pérdidas en la porosidad y estabilidad estructural reduciendo la infiltración.

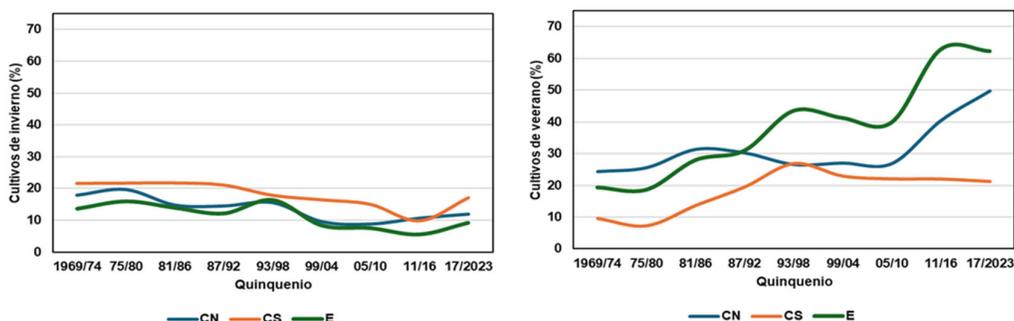


Figura 12: Evolución de la Participación relativa del área con cultivos de invierno y de verano según sectores de la provincia de La Pampa. CN: Centro Norte, CS: Centro Sur y E: Este. Elaboración propia con datos de series históricas de estimaciones agrícolas del Ministerio de Economía (2024) en: <https://datosestimaciones.magyp.gob.ar/> (último acceso Octubre 2024).

La intensidad de uso de los suelos, medida en términos de los días ocupados con cultivos, es similar entre los tres sectores de producción agrícola en la provincia de La Pampa y representa entre el 50 y el 67 % del periodo libre de heladas. La contribución relativa de las gramíneas, y la cobertura verde durante el invierno provista por la siembra de cereales invernales de cosecha en mayor magnitud entre las diferentes áreas agrícolas pampeanas (Tabla 6). Las secuencias agrícolas con reducida proporción de gramíneas con consecuente aumento de especies de oleaginosas anuales son poco efectivas para el mantenimiento de los niveles de materia orgánica de los suelos (Fernandez *et al.* 2020b). Además, si bien el maíz representa entre el 30 y el 42 % del área sembrada con cultivos anuales (Fig. 13) sus aportes a la protección de los suelos son de variado impacto porque incorporación en planteos con propósitos ganaderos, y a diferencia del resto de los cultivos anuales, muestra una proporción media cosechada de entre el 40 y el 80 % (Fig. 14). Este manejo contempla su uso en pastoreos diferidos, cosechas de granos húmedos y ensilado y sobre los aportes de biomasa remanente a la conservación de los suelos.

Tabla 6: Indicadores de uso actual del suelo en la provincia de La Pampa. Promedio del quinquenio 2017-2023. Elaboración propia con datos de series históricas de estimaciones agrícolas del Ministerio de Economía (2024) en: <https://datosestimaciones.magyp.gob.ar/> (último acceso Octubre 2024).

Indicador	Sector de la provincia de La Pampa		
	Centro Norte	Centro Sur	Este
Intensidad de uso del suelo (días año ⁻¹)	111	111	115
Superficie con gramíneas (%)	66	81	51
Superficie con cobertura verde invernal (%)	21	45	14

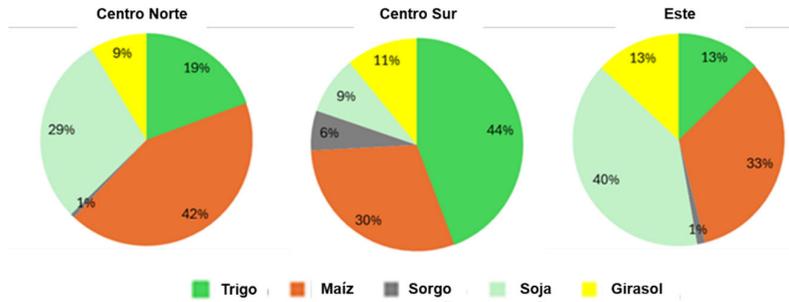


Figura 13: Participación relativa del área con cultivos anuales según sectores de la provincia de La Pampa. Promedio del quinquenio 2017-2023. Elaboración propia con datos de series históricas de estimaciones agrícolas del Ministerio de Economía (2024) en: <https://datosestimaciones.magyp.gob.ar/> (último acceso Octubre 2024).

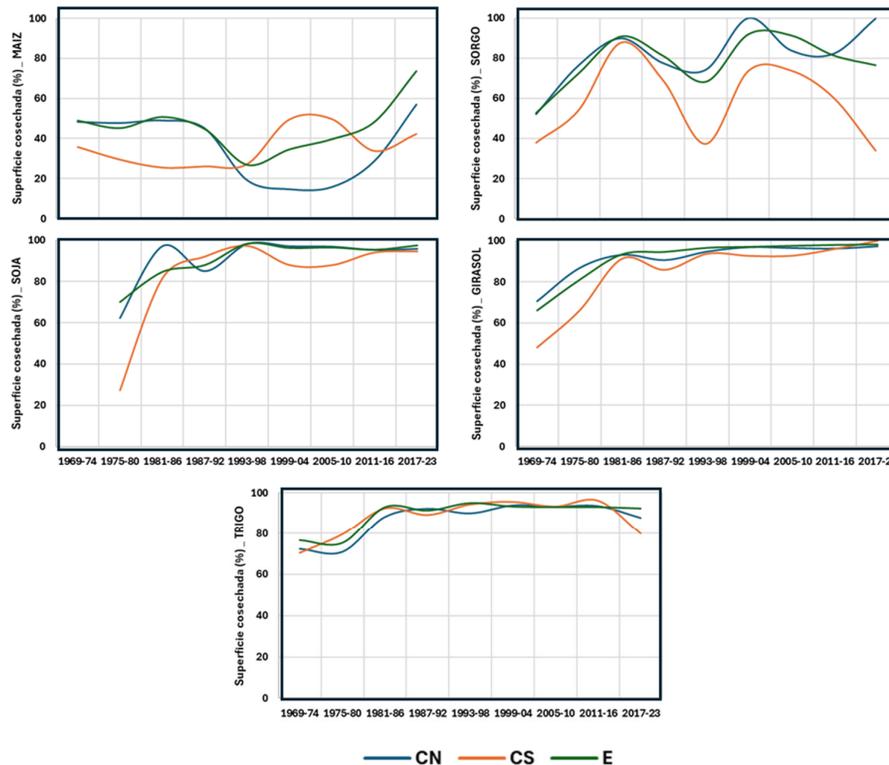


Figura 14: Evolución quinquenal de la proporción cosechada de cultivos de granos sembrados en la provincia de La Pampa. CN: Centro Norte, CS: Centro Sur y E: Este. Elaboración propia con datos de series históricas de estimaciones agrícolas del Ministerio de Economía (2024) en: <https://datosestimaciones.magyp.gob.ar/> (último acceso Octubre 2024).

Los indicadores de uso de los suelos muestran que la intensificación productiva sustentable por incorporación de doble cultivos de cosechas es limitada y que además las secuencias actuales, principalmente hacia el centro norte y el este de la región con menor presencia de cultivos con crecimiento durante el invernal serían de riesgo para la protección ante procesos erosivos y para la preservación de la porosidad de los suelos. Los aportes de residuos al incorporar cultivos de cobertura en sistemas sin laboreo de suelos incrementan la biomasa microbiana mejorando la actividad biológica y el secuestro de carbono. En

condiciones de estudios en la región semiárida pampeana la máxima carga de biomasa microbiana se alcanzó dentro de los 3 años de inclusión de cultivos de cobertura y bajo condiciones favorables de humedad y temperatura provisto por la mayor cobertura con residuos orgánicos (Frasier *et al.* 2016). Abundantes estudios locales muestran que la incorporación de cultivos de cobertura con crecimiento invernal, además de reducir los riesgos de erosión en suelos vulnerables, tienen efectos positivos sobre los contenidos de materia orgánica, la infiltración, la resistencia a la penetración y la estabilidad de los agregados (Rimski-Korsakov *et al.* 2015). Sin embargo, los resultados de su inclusión en el corto plazo tienen efectos variados sobre los cultivos en rotación son variados y en general no muestran beneficios económicos (Rimski-Korsakov *et al.* 2015). Luego de 5 años de secuencias con cultivos de cobertura invernal, las mejoras descritas en los rendimientos de soja en rotación con cultivos de cobertura con fertilización se explicarían en parte al ciclado de diferentes nutrientes durante el ciclo de soja dado que no se describieron otros cambios significativos en indicadores ligados a los contenidos de materia orgánica de los suelos (Fernandez *et al.* 2020a). En el largo plazo, los cultivos de cobertura, específicamente de leguminosas en sistemas sin laboreo de suelos pueden incrementar servicios ecosistémicos de los suelos relacionados con el almacenaje del agua y del carbono, el hábitat para biodiversidad y la disponibilidad de nutrientes (Frasier *et al.* 2016). El manejo de los suelos con altos aportes orgánicos subsuperficiales, como es la inclusión de cultivos de cobertura en secuencias agrícolas, contribuye positivamente a la recuperación del carbono (Frasier *et al.* 2024).

Fertilización y manejo de la nutrición

La formación del rendimiento de los cultivos es el resultado de un proceso continuo de crecimiento estrechamente ligado a la transpiración y a la duración de la actividad fotosintética de las plantas. Ante limitaciones en la disponibilidad e incorporación oportuna de nutrientes el crecimiento de las plantas y la consecuente producción de granos se reducen. Abundan los estudios en la región semiárida pampeana que muestran que aumenta la eficiencia de uso de agua transpirada al fertilizar y corregir limitaciones nutricionales. Por ejemplo, Funaro *et al.* (2006) concluye al fertilizar con nitrógeno aumenta la eficiencia de uso del agua útil almacenada en el suelo al sembrar girasol pasando de 12,9 a 15,9 kg ha⁻¹ mm⁻¹. La mayor productividad física y económica del agua también se observa al fertilizar cultivos de invierno (Gaggioli *et al.* 2020), principalmente en campañas con menores precipitaciones (“secas”) y en suelos con mayor proporción de arenas (Fig. 15). En parte, estas mejoras se atribuyen al mayor crecimiento de las plantas desde estadios tempranos aumentando la proliferación de raíces y su crecimiento profundo (Cerliani *et al.* 2011). También, al mejorar el estado de nutrición de las plantas durante los estadios vegetativos es mayor el crecimiento inicial, la tolerancia al estrés (Díaz-Zorita *et al.* 2022).

En esta región semiárida, es frecuente la siembra de maíz en densidades inferiores a las óptimas para promover, en parte, mayor disponibilidad inicial de agua para las plantas y reducir fallas en la formación del rendimiento (Maddoni *et al.* 2021). En estas condiciones, la fertilización en la siembra con nitrógeno y con fósforo contribuye a mejorar la formación de estructuras compensatorias del rendimiento y consecuente eficiencia de uso del agua disponible para el cultivo (Fig. 16). La aplicación sólo de nitrógeno en la siembra sería insuficiente para mejorar la prolificidad en cultivos sembrados en baja densidad de siembra (Loza *et al.* 2022). Además de los efectos sobre los rendimientos, bajo condiciones no limitantes de nutrición, las mejoras en crecimiento de las plantas repercuten positivamente

sobre indicadores de calidad y de productividad de los suelos. Tal es el caso de la mayor infiltración descrita en suelos del centro-norte de la provincia de La Pampa al aumentar los aportes de fósforo aplicados en sistemas agrícolas de largo plazo (Alvarez *et al.* 2024). En este estudio, la infiltración básica del agua aumentó de 45 a 90 mm h⁻¹ al aplicar anualmente 12 kg ha⁻¹ de fósforo durante 6 campañas con una rotación de maíz, soja y trigo/soja de segunda en siembra directa. Al aplicar 24 kg ha⁻¹ de fósforo la infiltración básica fue de 110 mm h⁻¹. La mayor infiltración indica mejoras en la cantidad, continuidad y estabilidad del sistema poroso permitiendo una mayor eficiencia de infiltración y conducción del agua creando una mejor condición de acceso a la solución del suelo por las raíces en crecimiento tanto del cultivo fertilizado como los siguientes en rotación.

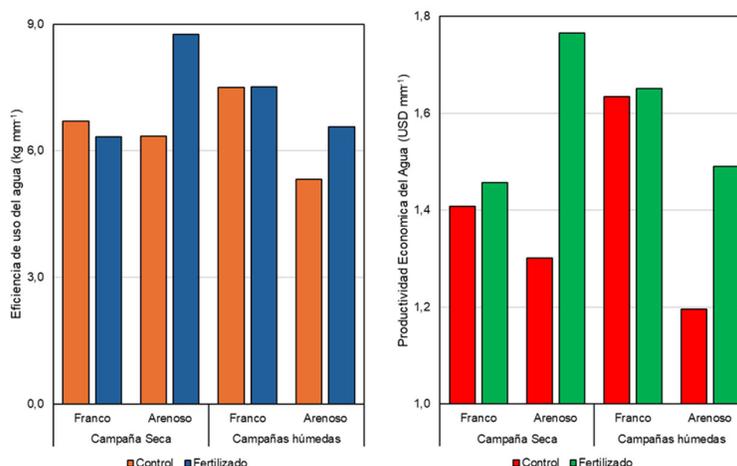


Figura 15: Productividad física y económica de uso del agua en cultivos de invierno en la región de la pampa arenosa. Adaptado de Gaggioli *et al.* (2020).

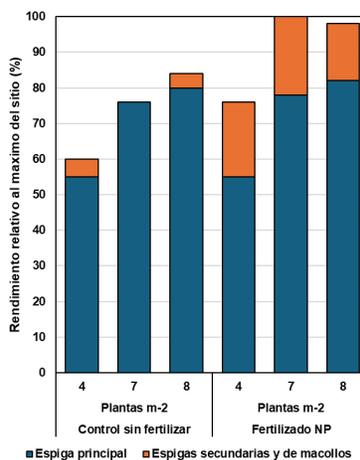


Figura 16: Rendimiento de maíz en un sitio del centro sur de la región semiárida pampeana según densidades de siembra y fertilización con nitrógeno y con fósforo aplicados en el momento de la siembra. Díaz-Zorita (datos no publicados).

Tal lo observado en otras áreas agropecuarias argentinas, en la región semiárida pampeana, y aun reconociéndose la importancia del aporte adecuado de nutrientes para el sostenimiento del crecimiento y la producción de cultivos, aumenta la frecuencia de limitaciones en la fertilidad de los suelos. Por ejemplo, el relevamiento reciente de casi 3000 sitios de siembra de pasturas y de cultivos en la provincia de La Pampa comparado con estudios realizados durante la década del 2010, sugiere la expansión hacia el sur y el oeste del área con niveles de fósforo extractables que limitan el normal crecimiento de todos los

cultivos contemplados en las secuencias agropecuarias de la región (Díaz-Zorita, 2023). La oferta de nitrógeno evaluada en forma de nitratos en lotes a sembrar con trigo en la región de la pampa arenosa también tiende a disminuir (Fig. 17). La reducción en los niveles de nutrientes en esta región, por ejemplo, fósforo, no son recientes y se atribuyen a la intensificación agrícola en tierras de baja aptitud y a la falta de reposición de nutrientes (Montoya *et al.* 1999).

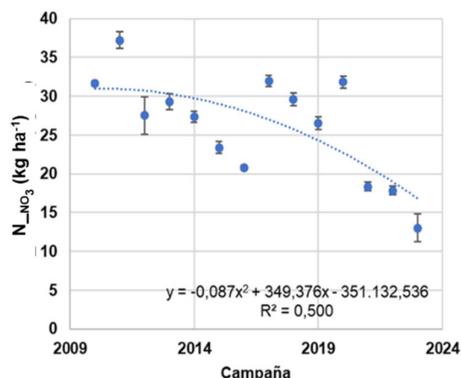


Figura 17: Evolución del contenido medio de nitrógeno en la capa de 0 a 40 cm de profundidad de lotes a sembrar con trigo en Hapludoles del oeste de la provincia de Buenos Aires. Elaboración propia con registro de la base de datos agrícolas de El Ganado SRL (datos no publicados).

Aun con escasa proporción de lotes evaluados anualmente, son evidentes las deficiencias nutricionales principalmente de nitrógeno, de fósforo y de azufre en una amplia área del centro de la región semiárida pampeana

En la provincia de La Pampa, con diferencias en las dosis aplicadas entre sectores y cultivos, es muy frecuente la aplicación de fertilizantes nitrogenados en cereales de cosecha y en girasol (Tabla 7). El uso de fertilizantes fosfatados entre cultivos y sectores de la provincia es más disperso, pero con menor variabilidad en la dosis media utilizada en cada cultivo (Tabla 8). En general, las dosis aplicadas de nitrógeno y de fósforo cubren más del 70 % de los requerimientos medios para la producción de trigo, pero son inferiores al 50 % de las necesidades para el crecimiento de los cultivos de verano (Tabla 9).

Tabla 7: Frecuencia y dosis media de fertilización nitrogenada en cultivos anuales según sectores de la provincia de La Pampa. Elaboración propia con datos de bases de datos agrícolas de AACREA, Fertilizar AC e información calificada de profesionales del CIALP y de APALP (última consulta en Octubre 2024).

Cultivo	Frecuencia de uso (%)			Dosis de nitrógeno (kg ha ⁻¹)		
	Sector de la provincia			Sector de la provincia		
	Centro Norte	Centro Sur	Est e	Centro Norte	Centro Sur	Este
Trigo	100	89	99	62	52	81
Girasol	91	86	94	7	14	18
Maíz de siembra en primavera temprana	100	100	100	72	44	83
Maíz de siembra en primavera tardía	94	95	98	48	34	59

Tabla 8: Frecuencia y dosis media de fertilización fosfatada en cultivos anuales según sectores de la provincia de La Pampa. Elaboración propia con datos de bases de datos agrícolas de AACREA, Fertilizar AC e información calificada de profesionales del CIALP y de APALP (última consulta en Octubre 2024).

Cultivo	Frecuencia de uso (%)			Dosis de fósforo (kg ha ⁻¹)		
	Sector de la provincia			Sector de la provincia		
	Centro Norte	Centro Sur	Este	Centro Norte	Centro Sur	Este
Trigo	91	74	95	12	17	91
Girasol	89	86	92	10	13	89
Maíz de siembra en primavera temprana	100	100	96	9	18	100
Maíz de siembra en primavera tardía	89	82	95	11	14	89
Soja de primera	34	71	63	8	9	10
Soja de segunda	0	0	21	0	0	8

Tabla 9: Porcentaje de aporte de nitrógeno y de fósforo a la nutrición de cultivos según sectores de la provincia de La Pampa. Elaboración propia con datos de uso de fertilizantes (Tablas 7 y 8) y de series históricas de estimaciones agrícolas del Ministerio de Economía (2024) en: <https://datosestimaciones.magyp.gob.ar/> (último acceso Octubre 2024). En soja se consideró una contribución aparente de la fijación biológica de nitrógeno equivalente al 50 % de los requerimientos de los cultivos.

Cultivo	Nitrógeno			Fósforo		
	Sector de la provincia			Sector de la provincia		
	Centro Norte	Centro Sur	Este	Centro Norte	Centro Sur	Este
Trigo	74	71	83	78	82	101
Girasol	7	14	15	35	39	39
Maíz de siembra en primavera temprana			34			40
Maíz de siembra en primavera tardía	24	34	31	28	52	38
Soja de primera	50	50	50	12	42	25
Soja de segunda	50	50	50	0	0	12

La figura 18 muestra los resultados de balances aparentes de nitrógeno y de fósforo al integrar la producción media actual en los tres sectores de la provincia de La Pampa analizados. El manejo actual promedio de la nutrición en el centro-sur tiende al equilibrio dada en parte por la mayor proporción relativa de trigo, cultivo que en general muestra balances aparentes de nutrientes próximos a la neutralidad. En el caso de las regiones este y centro-norte los balances aparentes de nitrógeno y de fósforo son en promedio anualmente negativos extrayéndose aproximadamente 40 kg ha⁻¹ más de nitrógeno que lo aportado al fertilizar o por la incorporación derivada de la fijación biológica al incluir soja

en las secuencias de cultivos. En el caso del fósforo, la extracción media en estas regiones es de aproximadamente 8 kg ha^{-1} por sobre los aportes con fertilizantes. En estas condiciones, y considerando solo los aportes de los nutrientes empleados con mayor frecuencia en la región, la nutrición actual de los cultivos es insuficiente para lograr un crecimiento de las plantas acorde a la disponibilidad de otros recursos, principalmente agua.

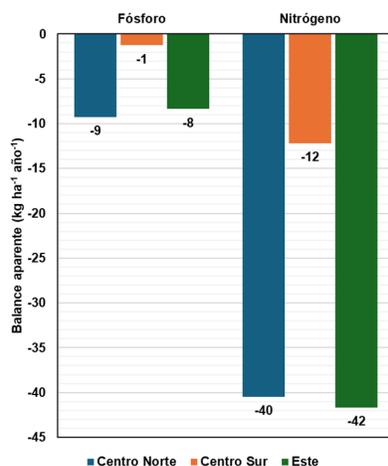


Figura 18: Balance aparente de fósforo y de nitrógeno en sectores agrícolas de la provincia de La Pampa. Elaboración propia con datos de frecuencia y dosis de fertilización (Tablas 7 y 8) y de series históricas de estimaciones agrícolas del Ministerio de Economía (2024) en: <https://datosestimaciones.magyp.gob.ar/> (último acceso Octubre 2024). En soja se consideró una contribución aparente de la fijación biológica de nitrógeno equivalente al 50 % de los requerimientos de los cultivos

El análisis sobre el balance aparente de nutrientes considera solo los aportes de los elementos por fertilización por lo que sus efectos directos en producción de los cultivos es parcial. La implementación de estrategias de manejo de la fertilización requiere integrar la interpretación de indicadores edáficos de fertilidad y expectativas de crecimiento de los cultivos, la localización y tipos de fertilizantes y los momentos y dosis de fertilización. Estudios sobre estrategias de fertilización realizados en la región semiárida pampeana muestran que las prácticas frecuentes para su manejo alcanzan niveles de producción inferiores a los logrables con la incorporación balanceada de nutrientes mayormente en la siembra o durante la implantación de los cultivos (Fig. 19). Es así como la productividad biológica del agua está limitada por el manejo de la nutrición de los cultivos afectando, además del crecimiento del cultivo fertilizado, la preservación y mejora del suelo y ambiente productivo.

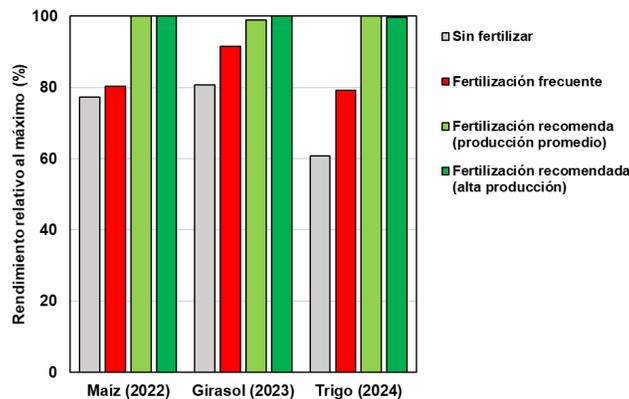


Figura 19: Rendimientos de la secuencia maíz-girasol-trigo en un Haplustol éntico del centro-sur de la provincia de La Pampa según estrategias de fertilización. Díaz-Zorita (datos no publicados).

Discusión sobre la evolución y la proyección de la agricultura en La Pampa

El crecimiento reciente de la producción de granos en la provincia de La Pampa (Fig. 6) está impulsado por factores socioeconómicos y culturales combinados con la implementación de procesos para el manejo de los cultivos y en el uso de insumos.

La frontera agrícola delimitada desde inicios del siglo XX no ha tenido desplazamientos geográficos (Frank, 2023). Sin embargo, los aumentos momentáneos en las lluvias, principalmente luego de 1980 promovieron al aumento de la superficie con cultivos en el centro sur de la región semiárida pampeana en reemplazo de pasturas anuales y perennes o pastizales. Asimismo, se observa la mayor elección por cultivos de verano por sobre los invernales (Fig. 7).

En el marco actual de cambio climático en la región (Gobierno de La Pampa, 2023), las condiciones alta evapotranspiración potencial con aportes de lluvias escasos y erráticos son crecientes en frecuencia e intensidad. La ocurrencia cada vez más habitual de temperaturas máximas y mínimas extremas y extemporáneas es un conocido condicionante afectando el normal crecimiento de las plantas. Este escenario de incertidumbre y variabilidad climática requiere considerar mayor diversificación en los planteos agrícolas tal de ampliar, principalmente en los cultivos de verano, los momentos de exposición de los períodos críticos de formación del rendimiento combinando diferentes especies, fechas de siembra y ciclos de crecimiento de los materiales.

Las frecuentes restricciones de las temperaturas extremas y de alta demanda de agua sobre el crecimiento de los cultivos, limitan la interceptación de radiación, afectando el crecimiento y, consecuentemente, las posibilidades de competencia frente a las malezas. Si consideramos que en esta región las condiciones operativas para la aplicación de fitosanitarios conducen habitualmente a controles inoportunos e ineficientes de malezas, la elección de los materiales y de la estructura de los cultivos es un factor importante para considerar.

La cobertura del canopeo, principalmente hasta la floración de los cultivos, requiere considerar densidades y distanciamientos entre plantas que maximicen el uso del agua disponible en el suelo a la siembra (Maddoni *et al.* 2021). La siembra subóptima de individuos expone a la pérdida de agua por evaporación del agua del suelo, menor competencia de estos con las malezas y a mayor dependencia de la habilidad compensatoria de estructuras reproductivas para la formación del rendimiento. Esta última estrategia está fuertemente limitada por la baja disponibilidad de nutrientes y la ausencia de condiciones para el vigoroso crecimiento vegetativo (Fig. 15).

La fragilidad natural de los suelos, y su mayor exposición a procesos de degradación, limita el sostenimiento de las actividades agropecuarias en la región. Abundan los registros locales que validan que la implementación de prácticas de conservación de suelos (labranza cero, cultivos de cobertura y en franjas) redundan positivamente sobre la factibilidad de producción de cultivos (Quiroga *et al.* 2015). Estas decisiones de manejo se centran en la protección de los suelos. Los laboreos de los suelos como práctica para el control de malezas, además de promover a la pérdida de agua y de reducir las oportunidades de siembra oportuna de cultivos, intensifican su degradación exponiéndolos a procesos de erosión eólica. Los vientos, frecuentes e intensos, también limitan las condiciones para el control químico de las malezas y la aplicación de otros fitosanitarios para el manejo de los cultivos requiriéndose un análisis local de las oportunidades en el dimensionamiento de equipamientos y del personal capacitado para su implementación.

La protección de los suelos es indispensable para sostener su capacidad productiva y requiere de la incorporación abundante de raíces, principalmente de crecimiento invierno-primaveral, y del mantenimiento de su cobertura evitando su laboreo. Ante la reducción relativa de cultivos invernales de granos en las secuencias agrícolas en la región es necesaria la promoción y adopción estratégica de cultivos de cobertura atendiendo a que sus beneficios sobre los sistemas de producción no son inmediatos e inicialmente muestran inconsistentes resultados con los cultivos inmediatos en rotación (Frasier *et al.* 2024).

La disponibilidad de nutrientes limita la productividad del agua transpirada durante el ciclo de crecimiento de las plantas (Fig. 15). Ante el aumento en los sitios con oferta insuficiente de nutrientes es indispensable implementar planteos correctos de fertilización. Estas estrategias tienen que contemplar la incorporación temprana de los elementos aplicados en la solución del suelo tal de lograr su disponibilidad temprana, oportuna y en cantidad suficiente para mejorar la formación del sistema de raíces. Los tratamientos de semillas con microorganismos mejoradores del crecimiento vegetal, por ejemplo, *Azospirillum argentinense*, son una alternativa para mejorar el crecimiento temprano de los cultivos particularmente la formación de raíces reflejándose en mayor producción inicial de biomasa aérea (Maroniche *et al.* 2024). El resultado sobre los rendimientos si bien son de variada magnitud su recurrente ocurrencia es una alternativa para preservar la estructura de los suelos y la protección superficial con residuos vegetales.

En este contexto, los balances aparentes de nutrientes contemplando solo la extracción de estos con la producción de granos son un indicador parcial de proyección en la evolución del estado nutricional de los suelos. Evidencias de la aplicación abundante de fertilizantes de alta calidad en suelos agrícolas superando la extracción en los granos condujo en diferentes regiones del mundo a superar niveles críticos de fósforo tal que en la actualidad su mantenimiento se ajuste solo a reponer la cantidad removida por la cosecha (Bruulsema *et al.* 2019).

La implantación de cultivos en suelos sin restricciones nutricionales, en particular de fósforo, es un requerimiento indispensable para sostener los sistemas agrícolas (Cordell *et al.* 2009). Es importante su reconocimiento no solo por los productores agropecuarios sino por el resto de la cadena para integrar decisiones políticas y culturales que permitan mejorar la eficiencia de uso del agua y de otros insumos y prácticas productivas.

El ambiente para el crecimiento de los cultivos en condiciones de incertidumbre climática con suelos frágiles y con limitaciones en la administración y disponibilidad de agua y de nutrientes requiere considerar con atención al ambiente de crecimiento de las plantas como individuos. Producir y conservar la cobertura de los suelos reduce las pérdidas de agua por evaporación y compite con malezas, aumentando la transpiración y consecuente crecimiento del cultivo. Este crecimiento, sostenido desde la germinación y emergencia, mejora cuando la solución del suelo accesible para las raíces aporta suficiente concentración de nutrientes.

El resultado de la administración responsable del agua almacenada al momento de la siembra permite mejorar la productividad del agua transpirada y consolidar la estructura de los suelos permitiendo así preservar su calidad.

Se requiere, en cada ciclo productivo, alcanzar condiciones favorables para el crecimiento vigoroso de las plantas atendiendo a las variaciones en la oferta de recursos en cada sitio de producción. Esta construcción permanente del ambiente productivo hace posible la agricultura en la región semiárida pampeana. Las diversas, dinámicas y costosas decisiones de manejo de los cultivos necesarias para esta construcción de ambientes tienen efectividad limitada si solo se considera el resultado individual de cada ciclo productivo.

Es indispensable planificar y actuar en el mediano plazo, integrar nuevas y diversas herramientas de valorización de la producción por ejemplo al considerar al suelo como destino y reservorio de carbono para gestionar bonos de carbono generados al intensificar su uso. Además de los productores agrícolas, el riesgo productivo tiene que participarse en la cadena de actores intervinientes tal de permitir establecer decisiones de largo plazo que permitan expresar los beneficios de implementar decisiones agronómicas de construir ambientes productivos.

Conclusiones

En la región semiárida pampeana, con escenarios climáticos inciertos y suelos frágiles, una agricultura exitosa es posible sólo si es sustentable. Para lograrlo se requiere conservar los suelos, optimizando la cosecha y el uso del agua. Sin embargo, la conservación del suelo y del agua no son suficientes para superar las rigurosas condiciones en planteos agrícolas de regiones semiáridas y se requiere considerar y adoptar otras tecnologías agropecuarias de producción.

Es crítico “construir ambiente” con raíces, con suelos cubiertos y con adecuada nutrición de cada cultivo. Es fundamental priorizar la implantación oportuna de variedades genéticas adaptadas y satisfacer las necesidades nutricionales de los cultivos, protegiendo así la cobertura y estabilidad de los suelos.

Literatura citada

- Alvarez, C. O. 2020. La importancia del agua para producir trigo en la región semiárida y subhúmeda pampeana. *Notas Agrícolas Pampeanas* 1: 7-8.
- Alvarez, C.; M. Saks; R. Fernández; A. Quiroga; N. Peinetti. 2024. Fósforo un aliado de la productividad y calidad de los suelos en la región semiárida pampeana. *Actas del XXIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, S.F. del V. de Catamarca (Catamarca, Argentina)*, pp.751.
- Barraco, M.; M. Díaz-Zorita; G. A. Duarte, G. 2007. Corn and Soybean Residue Covers Effects on Wheat Productivity Under No-Tillage Practices. En: Buck, H. T.; J. E. Nisi; N. Salomón (Eds.) *Wheat Production in Stressed Environments. Developments in Plant Breeding*, vol 12. Springer, Dordrecht (Holanda). https://doi.org/10.1007/1-4020-5497-1_27.
- Bazán Azargado, R. N.; G. Vergara; G. Casagrande; M. J. Méndez. 2024. Comparación y evolución de la evaporación de tanque y evapotranspiración de referencia en la región semiárida pampeana central. *Semiárida*, 34: 5-12.
- Bolsa de Cereales. 2024. Informes y datos del Relevamiento de Tecnología Agrícola Aplicada (ReTAA). <https://www.bolsadecereales.com/tecnologia-informes> (último acceso Octubre 2024).
- Bono, A.; R. Alvarez; J. de Paepe. 2017. Water use of wheat, corn and sunflower in the semiarid pampas. *Ci. Suelo (Argentina)* 35: 273-283.
- Bruulsema, T. W.; H. M. Heidi; L. I. Prochnow. 2019. The Science of 4R Nutrient Stewardship for Phosphorus Management across Latitudes. *Journal of Environmental Quality* 48: 1127-1560.
- Buschiazzo, D. E. 1986: Estudio sobre la Tosca. Parte I: Evidencias de un movimiento descendente del carbonato en base a la interpretación de características macro y geomorfológicas. *Ci. Suelo (Argentina)* 4: 55-65.
- Buschiazzo, D. E. 2006. Management systems in southern South America. En: Peterson G. A.; P. W. Unger, W. A. Payne (Eds.) *Dryland Agriculture, 2nd Ed., Monograph 23. ASA/CSSA/SSSA, Madison, WI (USA)*, pp 395-426.
- Buschiazzo, D. E.; Z. Roberto; J. C. Colazo; J. E. Panebianco. 2015. Procesos y estado de la degradación de los suelos en la provincia de La Pampa. En: Casas, R. R. y G. F. Albarracín (Compiladores), *El Deterioro de los Suelos y del Ambiente en la Argentina*, FECIC, Editorial Dunken, C. A. de Buenos Aires (Argentina), II: 141-153.
- Cantero-Martínez, C.; D. Moret; J. Lampurlanés. 2010. Economía del agua en sistemas de secano mediterráneos. En: González E. J.; R. Ordóñez; J. A. Gil (coords.). *Aspectos agronómicos y medioambientales de la agricultura de conservación*, Eumedia (ed.), Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (España), 127-141.
- Casagrande, G.; H. Conti. 1980. Clima. En: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Provincia de La Pampa y Universidad Nacional de La Pampa, *Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa*, ISAG, Buenos Aires (Argentina), 493 pp.
- Casagrande; G. A.; G. T. Vergara. 1996. Características climáticas de la Región. En: D. E. Buschiazzo; J. L. Panigatti; F. J. Babinec (Eds.), *Labranzas en la Región Semiárida Argentina Centro Regional La Pampa - San Luis*, INTA. pp.11-17.

- Cerliani, C.; G. Esposito; G. Balboa; C. A. Castillo; G. Balboa. 2011. Influencia de la descompactación y fertilización en el desarrollo radical de soja y maíz. Argentina. Rio Cuarto. 2011. V Jornada científico-técnica de la Facultad de Agronomía y Veterinaria. Univ. Rio Cuarto/Facultad de Agronomía y Veterinaria.
- Cordell, D.; J. Drangert; S. White. 2009. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change* 19: 292-305.
- Díaz-Zorita, M. 2023. Evaluación actual de la fertilidad de suelos de la provincia de La Pampa: fósforo extractable. *Notas Agrícolas Pampeanas* 9: 11-13.
- Díaz-Zorita, M.; C. O. Alvarez; C. Brambilla; G. A. Duarte. 2018. Crops and soils respond differently to residue cover management in no-till systems from the pampas region. Rio18-21st World Congress of Soil Science, Rio de Janeiro, Brazil, 12-17 Ago 2018.
- Díaz-Zorita, M.; D. E. Buschiazzo. 2006a. The potential for soil carbon sequestration in the Pampas. En: Lal, R.; C. C. Cerri; M. Bernoux; J. Etchevers; E. Cerri (Eds.), *Carbon Sequestration in Soils of Latin America*. The Haworth Press. Inc., New York, USA. pp. 369-382.
- Díaz-Zorita, M.; D. E. Buschiazzo. 2006b. Soils of the Pampas. *Soils of the Pampas*. En Lal, R. (Ed.), *Encyclopedia of Soil Science*. Taylor & Francis Group, New York, NY. USA, pp.1653-1657.
- Díaz-Zorita, M.; J. H. Grove; L. Murdock; J. Herbek; E. Perfect. 2004. Soil structural disturbance effects on crop yields and soil properties in a no-till production system. *Agron. J.* 96: 1651-1659
- Díaz-Zorita, M.; M. Barraco; D. Trasmonte. 2014. ¿Rotaciones o monocultivos en la pampa arenosa? En: *Actas del XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo - II Reunión Nacional "Materia Orgánica y Sustancias Húmicas"*. Producción sustentable en ambientes frágiles. AACS (ed.), Bahía Blanca, Bs. As., 5-9 Mayo. 2014. AACS. Argentina.
- Díaz-Zorita, M.; M. Barraco; P. Giron. 2022. ¿Qué dejaron los días con altas temperaturas en los maíces de primera cultivados en suelos "thaptos" del noroeste de Buenos Aires?. *Notas Agrícolas Pampeana* 6: 32-34
- Díaz-Zorita, M.; M. Cardoso Perassi; J. Montiel; L.P. Dalmasso; A. Dillchneider; F.G. Gonzalez. 2023. Rendimientos de un cultivar de trigo con introducción del gen HaHB4 según el manejo del nitrógeno y del agua. *Notas Agrícolas Pampeanas* 8: 30-33.
- Fernández, R.; C. O. Alvarez; A. R. Quiroga. 2020a. Efecto del uso de cultivo de cobertura en una secuencia de soja continua en la región semiárida pampeana. *Semiárida* 30: 37-49.
- Fernandez, R.; N. Furch; M. Bissolino; I. Frasier; E. Scherger; A. Quiroga, A. 2020b. Contribución de las pasturas perennes en la fertilidad física y biológica en molisoles de la Región Semiárida Pampeana. *Ci. Suelo (Argentina)*, 38, 1-16.
- Frank, F. 2023. Proyección de emisiones de gases invernadero de la producción agropecuaria en La Pampa bajo distintos escenarios. En: Facultad de Agronomía UNLPam, Mesa redonda "Cambio climático y producción agropecuaria en la región central". <https://youtube.com/watch?v=dPP12NvzgAI> (último acceso octubre 2024).
- Frasier, I.; A. Quiroga; E. Noellemeyer. 2016. Effect of different cover crops on C and N cycling in sorghum NT systems. *Science of the Total Environment* 562: 628-639.

- Frasier, I.; F. M. Barbero; C. Pérez-Brandan; M. F. Gómez; R. Fernández; A. R. Quiroga; G. Posse-Beaulieu; S. Restovich; J. Meriles; D. Lilia Serri; E. L. M. Figuerola; E. Noellemeyer; S. Vargas-Gil. 2024. Roots are the key for soil C restoration: A comparison of land management in the semiarid Argentinean Pampa. *Soil and Tillage Research* 235: 105918.
- Funaro, D.; N. Peinemann; E. Noellemeyer; M. Saks; A. Quiroga. 2006. Efecto de la disponibilidad de agua y nitrógeno para girasol en la región semiárida pampeana. En: Aspectos de la evaluación y el manejo de los suelos en la región semiárida pampeana. Nutrición de cultivos. Publicación técnica N° 67. EEA INTA Anguil. pp 26-34.
- Furch, L. O.; M. L. Molas; L. A. Seraci. 1993. Influencia de la profundidad de la tosca sobre los parámetros edáficos y la productividad de los cultivos. Trabajo Final de Graduación. *Semiárida*, 7: 59.
- Gaggioli, C.; E. Noellemeyer; A.R. Quiroga. 2020. Productividad física y económica del agua en cultivos invernales tradicionales y alternativos en la región semiárida pampeana. *Notas Agrícolas Pampeanas* 1: 4-6.
- Gobierno de La Pampa. 2023. Plan Provincial de Respuesta al Cambio Climático: Resumen para tomadores de decisiones. En: 2025). En: Boletín Oficial N°3656 - 3 de enero de 2025, Decreto N° 5120/24 (Anexo II), 22 pp. <https://boletinoficial.lapampa.gob.ar/anio-2025/20748-boletin-oficial-no-3656-3-de-enero-de-2025.html> (último acceso enero 2025).
- IDELP. 2018. Cobertura y uso del suelo. https://idelp.lapampa.gob.ar/visor_general (último acceso octubre 2024).
- Instituto de Suelos y Agrotecnia. 1948. La erosión eólica en la región pampeana y plan para la conservación de suelos. Ministerio de Agricultura de la Nación, Dirección General de Laboratorios e Investigaciones, Instituto de Suelos y Agrotecnia, Buenos Aires (Argentina), 235 pp.
- Kugler, W. 1955. La erosión por el viento y el cultivo bajo cubierta. *IDIA* 93-94: 1-30.
- Lal, R. 2019. Carbon Cycling in Global Drylands. *Current Climate Change Reports* 5: 221-232
- Loza, E.; L. P. Dalmasso; M. Díaz-Zorita. 2022. Fertilización nitrogenada, densidad y fecha de siembra de maíz en la región semiárida pampeana central. *Notas Agrícolas Pampeana* 6: 38-40.
- Maddonni, G. A.; M. Parco; D. H. Rotili. 2021. Manejo de la estructura del cultivo de maíz en ambientes marginales de la Argentina. *Agronomía y ambiente: Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires*, 41: 84-99.
- Maroniche, G.A.; M. L. Puente; J. E. García; E. Mongiardini; A. Coniglio; S. Nievas; M. M. Labarthe; F. Wisniewski-Dyé; E. Rodríguez Caceres; M. Díaz-Zorita; F. Cassán. 2024. Phenogenetic profile and agronomic contribution of *Azospirillum argentinense* Az39T, a reference strain for the South American inoculant industry. *Microbiological Research* 283: 127650.
- Martocci, F. 2014. La producción agrícola en los márgenes: prácticas, saberes e innovaciones en el territorio nacional de La Pampa (1883-1940). *Boletín del Instituto de Historia Argentina y Americana "Dr. Emilio Ravignani"*, Tercera serie, núm. 41, segundo semestre 2014, pp. 11-48.

- Massa, L. 1967 Historia de las misiones salesianas en La Pampa. Ed. Dn. Bosco. 467 pp.
- Mendez, M.; G. Vergara; G. Casagrande. 2023. Régimen de heladas en el centro del área agrícola de La Pampa. *Notas Agrícolas Pampeanas* 8: 6-8.
- Ministerio de Economía. 2024. Estimaciones agrícolas: Series históricas. <https://datosestimaciones.magyp.gob.ar/> (ultimo acceso octubre 2024).
- Montoya, J. C.; A. A. Bono; A. Suárez; N. A. Darwich; F. J. Babinec. 1999. Cambios en el contenido de fósforo asimilable en suelos del este de la provincia de La Pampa, Argentina. *Ci. Suelo (Argentina)* 17: 45-48.
- Quiroga A.; C. Gaggioli; R. Fernández; E. Noellemeyer. 2015. Contribución al manejo sustentable de suelos en zonas semiáridas. En: Casas, R. R. y G. F. Albarracin (Compiladores), *El Deterioro de los Suelos y del Ambiente en la Argentina*, FECIC, Editorial Dunken, C. A. de Buenos Aires (Argentina), I: 167-181.
- Quiroga, A. R.; D. O. Funaro; R. Fernandez; E. J. Noellemeyer. 2005. Factores edáficos y de manejo que condicionan la eficiencia del barbecho en la región pampeana. *Ci. Suelo (Argentina)* 23: 79-85.
- Rabinovich, J.; F. Torres. 2004. Caracterización de los Síndromes de Sostenibilidad del Desarrollo. El caso de Argentina. Taller "Síndromes de sostenibilidad del desarrollo en América Latina", Santiago de Chile. CEPAL, Serie Seminarios y Conferencias 38, 97pp.
- Rathore, V. S.; S. P. S. Tanwar; O. P. Yadav. 2019. Integrated Farming System: Key to sustainability in arid and semi-arid regions. *Indian Journal of Agricultural Sciences* 89: 181-92.
- Real Ortellado, M. 2020. Incendios, inundaciones y sequías en la pampa entre 1998 y 2018. Una mirada desde la perspectiva del riesgo y desastre ambiental. *Semiárida*, 30: 19-36.
- Rimski-Korsakov, H.; C. R. Alvarez; R. S. Lavado. 2015. Cover crops in the agricultural systems of the Argentine Pampas. *Journal of Soil and Water Conservation* 70: 112-118.
- Roberto, Z. E.; G. Casagrande; E. F. Viglizzo. 1994. Tendencias y variaciones del siglo en lluvias en La Pampa Central. Centro Regional La Pampa-San Luis, INTA. Publicación N°2, 25 pp.
- Satorre, E. H.; F. H. Andrade. 2021. Cambios productivos y tecnológicos de la agricultura extensiva argentina en los últimos quince años. *Ciencia Hoy* 29: 19-27
- Sombroek, W.; E. H. Sene. 1993. Land degradation in arid, semi-arid and dry sub-humid areas: rainfed and irrigated lands, rangelands and woodlands. Inter-governmental negotiating committee for the preparation of a convention to combat desertification and drought (INCD). First Substantive Session, Nairobi 24-28 May 1993; Rome, 20 May 1993 (<https://www.fao.org/4/x5308e/x5308e02.htm>, último acceso 21-Sept-2024)
- Valiente, O. M. 2001 Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. *Revista Investigaciones Geográficas del Instituto Universitario de Geografía (Universidad de Alicante, Alicante, España)* 26: 59 - 80.

- Vazquez; P.; E. de Elorriaga. 2024. Influencia geológica sobre el riesgo de salinización de suelos en el noreste de La Pampa. En: Auge, M.P.; C. Falcón; R. Abouy (compiladores), Aguas subterránea: retos para una gestión sostenible. Editorial de la Universidad Nacional de La Pampa, pp. 271-278.
- Vergara, G.; G. Casagrande, M.J. Mendez. 2022. Estadísticas agroclimáticas de la Facultad de Agronomía, Santa Rosa, La Pampa, Argentina. Periodo 1977-2021. *Semiárida*, 32 (Supl. 1): 7-41.
- Viglizzo, E. F.; L. V. Carreño; H. Pereyra; F. Ricard; J. Clatt; D. Pincén. 2010. Dinámica de la frontera agropecuaria y cambio tecnológico. En: Viglizzo, E.; E. Jobaccy (eds.) *Expansión de la frontera agropecuaria en la argentina y su impacto ecológico y ambiental*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Buenos Aires (Argentina) pp. 9-16.
- Viglizzo, E.; A. Pordomingo; M. Castro; F. Lértora. 2002. *La sustentabilidad ambiental del agro pampeano*. Programa Nacional de gestión Ambiental Agropecuaria. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Buenos Aires (Argentina), 84 pp.