

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**EFFECTO RESIDUAL DE LA COBERTURA INVERNAL SOBRE EL
SUMINISTRO DE NITRÓGENO Y EL RENDIMIENTO DE CEBADA
SEMBRADA DESPUÉS DE MAÍZ Y SOJA**

por

Joaquina LÓPEZ SELIOS

**Trabajo final de grado
presentado como uno de los
requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo**

**PAYSANDÚ
URUGUAY
2025**

Este Trabajo Final de Grado se distribuye bajo licencia
"Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**".



PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Director:

Ing. Agr. (Dr.) Oswaldo Ernst

Co-director:

Ing. Agr. (MSc.) Nicolás Fassana

Tribunal:

Ing. Agr. (Dr.) Oswaldo Ernst

Ing. Agr. (MSc.) Santiago Álvarez

Ing. Agr. (MSc.) Nicolás Fassana

Fecha:

8 de abril de 2025

Estudiante:

Joaquina López Selios

*A mis padres: Andrea y Fernando,
quienes siempre creyeron en mi*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a las dos personas que han hecho que esto sea posible y me han brindado su apoyo todos estos años: mis padres. Se merecen todo lo bueno que les pueda dar la vida y gracias por ser mi apoyo incondicional desde mis humildes comienzos. Este logro también es de ustedes, es compartido.

A Dios: por haberme permitido llegar hasta acá con salud y haberme puesto en el camino personas muy valiosas para mí.

A mi familia: mis hermanos, abuelos, tía, prima, y especialmente a mi hermana, nos hemos acompañado en todas las etapas y has sido una gran compañera de camino.

A mi tutor de tesis, Oswaldo Ernst, te agradezco por tu buena disposición cada vez que lo necesité, tu paciencia, tu admirable capacidad de convertir lo difícil en fácil y por transmitirme con claridad y calma tus conocimientos.

A mi co-tutor de tesis, Nicolás Fassana, gracias por tus aportes y participación.

A Santiago Álvarez, por la gran ayuda durante toda la tesis, por siempre estar a la orden y por haberme orientado cada vez que lo necesité.

A varios compañeros de generación que colaboraron durante la práctica de la tesis: Mercedes Verdaguer, Jaquin Molina, Lucas Camarano, Milagros Giudice, Flavio Viera, Joaquina Fernández. Hicieron que el trabajo a campo sea más ameno y más divertido también.

A los funcionarios de la EEMAC: Fabricio Ernst por la ayuda durante el trabajo a campo, Andrés Ferraz, por la ayuda durante el trabajo a campo y en el laboratorio y Laura Barreto, por la buena disposición y ayuda en el laboratorio.

A las funcionarias de la biblioteca de la EEMAC: Carol Guilleminot y Patricia Choca, por su amabilidad, su ayuda y su buena atención cada vez que acudí a ellas ya sea por un libro o alguna consulta sobre la tesis.

A todas las personas que aportaron de sí para que pudiera lograr mi objetivo: docentes, compañeros, amigos. Soy lo suficientemente afortunada de poder decir que son muchos y que pude llegar a esta instancia y recorrer este camino acompañada de grandes personas.

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	2
AGRADECIMIENTOS.....	5
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	9
RESUMEN.....	10
SUMMARY	11
1 INTRODUCCIÓN.....	12
2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 EFECTOS RESIDUALES DE LOS CS EN MAÍZ Y SOJA.....	14
2.1.1 Cultivos de cobertura.....	14
2.1.2 Disponibilidad de agua	14
2.1.3 Disponibilidad de Nitrógeno	16
2.1.4 Rendimiento de maíz y soja siguiendo diferentes cultivos de servicio....	19
2.2 EFECTO RESIDUAL DE LOS CS SOBRE EL CULTIVO POSTERIOR.....	21
2.2.1 Interferencia de los CS en malezas	21
2.2.2 CS en siembra asociada.....	21
2.2.3 Nitrógeno aportado al suelo por los residuos de leguminosas y sus consecuencias sobre las recomendaciones de N	22
2.2.4 Rendimiento del trigo, biomasa y composición de los CS, agotamiento del nitrógeno mineral del suelo y efecto residual de los CS.	22
2.3 EFECTO RESIDUAL DE LOS CS SOBRE LA SECUENCIA	23
3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
3.1 CARACTERÍSTICAS EXPERIMENTALES	26
3.1.1 Localización.....	26
3.1.2 Tipo de suelo e historia de la chacra.....	26
3.1.3 Diseño experimental y modelo estadístico	26
3.2 MANEJO Y DETERMINACIONES EN EL CULTIVO DE CEBADA	28
3.2.1 Manejo del barbecho y siembra del cultivo de cebada.....	28
3.2.2 Determinaciones de suelo	28

3.2.3	Determinaciones en el cultivo	28
3.2.4	Rendimiento en grano de cebada	29
4	RESULTADOS	31
4.1	CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA.....	31
4.2	EFFECTO RESIDUAL DE LOS CULTIVOS DE SERVICIO SOBRE EL APORTE DE NITRÓGENO DESDE EL SUELO	31
4.2.1	CONCENTRACIÓN DE $N-NO_3^-$ EN SUELO CON MAÍZ COMO CULTIVO ANTECESOR DE VERANO.....	32
4.2.2	CONCENTRACIÓN DE $N-NO_3^-$ EN SUELO TENIENDO COMO CULTIVO DE VERANO ANTECESOR SOJA	33
4.3	EFFECTO RESIDUAL EN CEBADA SEGÚN CULTIVO DE SERVICIO PREVIO A MAÍZ COMO CULTIVO ANTECESOR DE VERANO	33
4.3.1	PRODUCCIÓN DE BIOMASA, ABSORCIÓN DE N 55 DÍAS POST SIEMBRA Y PORCENTAJE DE N A ESPIGAZÓN SEGÚN CULTIVO DE SERVICIO Y FERTILIZACIÓN	33
4.3.2	COMPONENTES NUMÉRICOS DEL RENDIMIENTO EN GRANO.....	34
4.3.3	RENDIMIENTO Y CALIDAD FÍSICA DE GRANO.....	35
4.4	EFFECTO RESIDUAL EN CEBADA SEGÚN CS PREVIO A SOJA COMO CULTIVO ANTECESOR DE VERANO.....	36
4.4.1	PRODUCCIÓN DE BIOMASA, ABSORCIÓN DE N 55 DÍAS POST SIEMBRA Y PORCENTAJE DE N A ESPIGAZÓN SEGÚN CS.....	36
4.4.2	COMPONENTES NUMÉRICOS DEL RENDIMIENTO.....	37
5	DISCUSIÓN.....	39
5.1	EFFECTO RESIDUAL DE LOS CULTIVOS DE SERVICIO SEMBRADOS PREVIO AL CULTIVO DE VERANO SOBRE EL CULTIVO INVERNAL SIGUIENTE	39
5.1.1	MAÍZ COMO CULTIVO ANTECESOR DE VERANO.....	40
5.1.2	SOJA COMO CULTIVO ANTECESOR DE VERANO	40
5.2	EFFECTO RESIDUAL EN CEBADA SEGÚN CULTIVO DE SERVICIO PREVIO A MAÍZ Y SOJA COMO CULTIVOS ANTECESORES DE VERANO.....	41
5.2.1	BIOMASA Y ABSORCIÓN DE N A 55 DÍAS POST SIEMBRA	41

5.2.2	PORCENTAJE DE N A ESPIGAZÓN DE CEBADA.....	42
5.2.3	RENDIMIENTO: SUS COMPONENTES NUMÉRICOS	42
6	CONCLUSIONES.....	46
7	BIBLIOGRAFÍA.....	47
8	ANEXO.....	50

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla	Pág
Tabla 1 Agua disponible en suelo para Maíz y Soja con distintos CS como cultivo antecesor.....	15
Tabla 2 Contenido de N-NO ₃ ⁻ en suelo para Maíz y Soja con diferentes CS como antecesores	18
Tabla 3 Secuencia de cultivos de la chacra	26
Tabla 4 Concentración de N-NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹) en dos profundidades de suelo para cebada	32
Tabla 5 Concentración de N-NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹) en dos profundidades de suelo para cebada.....	33
Tabla 6 Biomasa producida y kg de N absorbido por cebada 55 días post siembra ..	34
Tabla 7 Porcentaje de N a espigazón según CS y fertilización nitrogenada (N).....	34
Tabla 8 Número de plantas/m ² , macollos/m ² y espigas/m ² de Cebada según CS y fertilización nitrogenada (N)	35
Tabla 9 Rendimiento en grano de cebada y calidad física de grano cuantificada como tamaño.....	35
Tabla 10 Peso de mil granos según interacción CS x fertilización y fertilización nitrogenada.....	36
Tabla 11 Biomasa producida y absorción de N por cebada 55 días post siembra	36
Tabla 12 Porcentaje de N a espigazón según CS.....	37
Tabla 13 Número de plantas/m ² , macollos/m ² y espigas/m ² de cebada según cultivo de servicio previo a soja	37
Tabla 14 Rendimiento en grano de cebada y calidad física de grano cuantificada como tamaño.....	37
Figura	
Figura 1 Contenido de N-NO ₃ ⁻ en suelo (1m) al momento de la quema de los CS....	16
Figura 2 Evolución del contenido de N-NO ₃ ⁻ en suelo a dos profundidades para Maíz	17
Figura 3 Evolución del contenido de N-NO ₃ ⁻ en suelo a dos profundidades para Soja	18
Figura 4 Cambio porcentual del rendimiento de maíz y soja entre los tratamientos con CS	20
Figura 5 Precipitaciones y temperatura registradas en la EEMAC durante el período en estudio (01/03/2023 al 30/11/2023).....	31
Figura 6 Relación entre N absorbido 55 días post siembra y rendimiento de cebada	43

RESUMEN

Este trabajo aborda el impacto de los cultivos de servicio (CS) invernales sobre el suministro de nitrógeno (N) y el rendimiento de cebada sembrada después de Maíz y Soja. Reconociendo los problemas de degradación de suelos debido a sistemas de producción que se caracterizan por utilizar pocas especies de cultivos y largos períodos de barbecho, el estudio propone alternativas de diferentes CS: gramíneas, leguminosas y su mezcla para proteger el suelo durante los barbechos invernales. Estos CS buscan no solo prevenir la erosión, sino también mejorar la sostenibilidad agrícola mediante la fijación o reciclaje de nutrientes. El presente estudio tiene como objetivos principales cuantificar el efecto residual de cultivos anuales sembrados para cubrir el suelo durante el invierno sobre el servicio “suministro de nutrientes” y rendimiento de cebada sembrada luego de dos antecesores de verano y determinar si existe una posible interacción con la fertilización nitrogenada cuando el antecesor de verano es maíz. Se emplearon distintas variedades y mezclas de CS: *Avena byzantina*, *Vicia villosa* y su Mezcla (*Avena byzantina* + *Vicia villosa*). El experimento se realizó en la Estación Experimental Mario A. Cassinoni (Paysandú), siguiendo un diseño en bloques completos al azar para Soja y un diseño de parcelas divididas en bloques completos al azar para Maíz. Se evaluaron parámetros como concentración de nitratos en el suelo, producción de biomasa y absorción de nitrógeno. Los resultados muestran que los CS de leguminosas, como *Vicia*, destacan en la fijación de nitrógeno y su disponibilidad en el suelo, mientras que las gramíneas, como *Avena*, se destacan en la cobertura del suelo. La mezcla de ambos tipos combinó beneficios, maximizando la biomasa y mejorando la eficiencia del uso de N. En cuanto a los cultivos posteriores, la cebada mostró mejores rendimientos con CS de leguminosas o mezclas, especialmente teniendo Maíz como cultivo previo. Sin embargo, las diferencias no siempre fueron significativas. Las condiciones climáticas, como la sequía, afectaron la dinámica de nutrientes y los rendimientos. La tesis concluye que la inclusión de cultivos invernales como cobertura del suelo genera un efecto residual en el suministro de nitrógeno, el cual se extiende al menos hasta el segundo cultivo de la secuencia. La implementación de leguminosas y mezclas, es esencial para la sostenibilidad agrícola al reducir la dependencia de fertilizantes y mejorar la conservación del suelo. Aunque implican costos iniciales, su implementación genera beneficios a largo plazo para la productividad y salud del ecosistema agrícola.

Palabras Clave: cultivos de servicio, nitrógeno, cebada

SUMMARY

This study addresses the impact of winter cover crops (CCs) on nitrogen (N) supply and the yield of barley sown after corn and soybeans. Recognizing the issues of soil degradation caused by production systems characterized by limited crop diversity and long fallow periods, the study proposes alternative CCs: grasses, legumes, and their mixtures, to protect the soil during winter fallows. These CCs aim not only to prevent erosion but also to improve agricultural sustainability by fixing or recycling nutrients. The main objectives of this study are: quantify the residual effect of annual crops sown to cover the soil during winter on the "nutrient supply" service and the barley yield sown after two summer crops predecessors and to determine if there is a possible interaction with nitrogen fertilization when the summer crop predecessor is corn. Different CC varieties and mixtures were used: *Avena byzantina*, *Vicia villosa*, and their mixture (*Avena byzantina* + *Vicia villosa*). The experiment was conducted at the Mario A. Cassinoni Experimental Station (Paysandú), using a randomized complete block design for soybean and a split-plot randomized complete block design for corn. Parameters evaluated included soil nitrate concentration, biomass production, and nitrogen uptake. Results indicate that legume CCs, such as vetch, excel in nitrogen fixation and availability in the soil, while grass CCs, such as oat, are more effective at providing soil cover. The mixture of both types combined these benefits, maximizing biomass production and improving N use efficiency. Regarding subsequent crops, barley showed better yields following legume CCs or mixtures, especially after corn as the previous crop. However, these differences were not always statistically significant. Climatic conditions, such as drought, affected nutrient dynamics and yields. The thesis concludes that the inclusion of winter cover crops generates a residual effect on nitrogen supply, which extends at least to the second crop in the sequence. The implementation of legumes and mixtures is essential for agricultural sustainability, as it reduces dependence on fertilizers and improves soil conservation. Although they involve initial costs, their implementation provides long-term benefits for the productivity and health of the agricultural ecosystem. While they involve initial costs, their implementation provides long-term benefits for productivity and agricultural ecosystem health.

Keywords: cover crops, nitrogen, barley

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años, en respuesta al reconocimiento de la degradación generalizada de los suelos, instituciones vinculadas al sector agropecuario han puesto vital importancia en divulgar la inviabilidad a corto y mediano plazo de los actuales sistemas de producción, los cuales se han visto simplificados utilizando pocas especies de cultivos y presentar largos períodos de barbecho.

En este contexto, en Uruguay se implementó a partir del 2013 el Plan de Uso y Manejo responsable del suelo, el cual se basa en la Ley N° 15239 creada en el año 1981 que declara de interés nacional promover y regular el uso y la conservación de los suelos con el objetivo de controlar el riesgo de erosión hídrica (Ley n° 15239, 1982). Debido a esto es que se ha puesto mayor importancia en el manejo de los períodos de barbechos invernales, ya que es durante este período cuando ocurren las mayores pérdidas de nutrientes por lavado y erosión del suelo, bajo el actual sistema de producción, dominado por la siembra de cultivos de verano con alta frecuencia de soja. Por tanto, se ha vuelto frecuente la siembra de cultivos invernales cuyo único objetivo es cubrir el suelo durante el invierno, reduciéndose así el riesgo de erosión de estos sistemas de cultivo.

En la misma línea, la simplificación de la secuencia agrícola, integrada por pocas opciones de cultivos afecta los servicios ecosistémicos en el sistema de cultivo, los cuales se definen como los beneficios que la naturaleza aporta a la sociedad y hacen posible la vida humana, mejorando la salud, la economía y la calidad de vida de las personas (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 2024). De manera de evitar su deterioro, es necesario diseñar sistemas agrícolas más sustentables, que cubran el suelo y presenten diversidad en las especies de la rotación.

En la actualidad, la inclusión de cultivos de cobertura en los sistemas de rotación durante los barbechos invernales se basa predominantemente en gramíneas invernales anuales, sembrándose en promedio en la zafra 22/23 26048 ha de cultivos de cobertura, correspondiendo a un 4% del total de la superficie ocupada por cultivos de invierno (Oficina de Estadísticas Agropecuarias [DIEA], 2023). Estos tienen como principal finalidad cubrir el suelo controlando las pérdidas por erosión. Además, reducen las pérdidas de nutrientes por lavado y contribuyen a mejorar la calidad del suelo mejorando las propiedades químicas, físicas y biológicas del mismo (Farm Progress, s.f.).

La inclusión de especies leguminosas anuales aportaría un servicio ecosistémico adicional, como lo es la fijación simbiótica de nitrógeno (N). De esta manera, además de la cobertura del suelo es posible reducir los requerimientos de fertilizante nitrogenado en el sistema de cultivo. En cuanto a las especies gramíneas invernales, son útiles para absorber nitrógeno en forma de nitratos residuales, aportar C e incrementar la cobertura del suelo (Ruffo & Parsons, 2004).

Si bien existen antecedentes nacionales y regionales sobre las ventajas de incluir cultivos de servicio (CS) de leguminosas anuales, son pocos los que evalúan el efecto residual de su incorporación en la secuencia de cultivos.

En este marco, los objetivos de este trabajo son:

- i) Cuantificar el efecto residual de cultivos anuales sembrados para cubrir el suelo durante el invierno sobre el servicio “suministro de nutrientes” y rendimiento de cebada sembrada luego de dos antecesores de verano.
- ii) Determinar la posible interacción con la fertilización nitrogenada cuando el antecesor de verano es maíz.

Las hipótesis de este trabajo son:

- i) Existe un efecto residual sobre el cultivo de invierno siguiente al de verano por mantener ciclando nitrógeno (a través de las gramíneas) y/o fijarlo (a partir de las leguminosas).
- ii) Con antecesor Maíz, el efecto depende de la fertilización nitrogenada al cultivo de invierno.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 EFECTOS RESIDUALES DE LOS CS EN MAÍZ Y SOJA

2.1.1 Cultivos de cobertura

Los cultivos de cobertura pueden ser especies gramíneas o leguminosas que se siembran a principios de otoño con el objetivo de reducir el riesgo de erosión (Farm Progress, s.f.). Cuando a este objetivo se le suman una multiplicidad de servicios ecosistémicos como el reciclaje de nutrientes del suelo, control de malezas, fijación simbiótica de N, manejo del ingreso y pérdida de agua entre otros, se les aplica el nombre de cultivos de servicio (Ernst et al., 2022).

Hay investigaciones que han demostrado que campos con CS invernales terminados en primavera presentaron un 55% menos de pérdidas de agua por escurrimiento y un 50% menos de pérdidas de suelo anual (Farm Progress, s.f.). Por otra parte, mantienen la productividad del suelo previniendo la pérdida de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, incrementando el carbono del suelo, la capacidad de retener agua y de mantener la estructura del suelo. Además, al incrementar la calidad del suelo y, por tanto, el enraizamiento de los cultivos de renta (Soja y Maíz) permiten lograr rendimientos más consistentes y evitar las variaciones que pueden ocurrir de un año a otro (Farm Progress, s.f.). Por otro lado, Rivière et al. (2022) infieren que puede presentarse una posible competencia por los recursos (nutrientes y agua) con los cultivos de renta.

2.1.2 Disponibilidad de agua

En un experimento realizado por Restovich et al. (2012) se evaluó el agua disponible luego de detener el crecimiento de los cultivos de servicio (CS) a dos profundidades de suelo (0 - 0,3 y 0,3 - 1 m), teniendo como CS Avena, Vicia, Avena + Vicia, entre otros en 5 años diferentes (2005, 2006, 2008, 2009 y 2010). Estos mismos autores encontraron que, en general, todas las especies utilizaron el agua entre los 0,3 - 1 m, pero la extracción de agua estuvo concentrada en el estrato entre 0 - 0,3 m. Solo, en algunos años, hubo diferencias significativas en cuanto al contenido de agua disponible con el tratamiento testigo (sin CS). Sin embargo, es importante destacar que entre gramíneas y leguminosas/mezcla en casi todos los años evaluados no hubo diferencias significativas en cuanto al agua disponible.

A su vez, dentro del mismo experimento, se evaluó el agua disponible (0- 1 m) en distintos estadios fenológicos de maíz y soja teniendo diferentes CS como antecesores (tabla 1).

Tabla 1*Agua disponible en suelo para Maíz y Soja con distintos CS como cultivo antecesor*

Tiempo de evaluación	Avena	Vicia	Avena + Vicia	Control
Agua disponible				
2005 muerte de los CS	83 d	98 cd	98 cd	170 a
Siembra Maíz	104 d	103 d	116 cd	165 a
Maíz en V5-V6	155 ab	133 cd	129 d	137 bcd
Maíz en floración	81 ab	53 c	83 ab	63 bc
Cosecha del Maíz	171 a	178 a	170 a	179 a
2006 muerte de los CS	116 bcd	103 cde	98 de	165 a
Siembra Soja	152 bc	126 c	125 c	164 b
Soja en R5 (llenando grano)	112 a	99 a	123 a	133 a
Cosecha Soja	185 bc	172 c	203 a	189 b

Nota. Adaptado de Restovich et al. (2012).

Según Restovich et al. (2012) el contenido de agua luego de la muerte de los cultivos de servicio está asociado a las especies utilizadas, a la fecha en la que se decide terminar el crecimiento de los mismos y a la producción de biomasa. En este sentido, se observa en la tabla 1 que en casi todos los años evaluados los CS redujeron la disponibilidad de agua en suelo en un rango entre 30 – 89 mm comparado con el tratamiento control. A la Siembra del maíz el control presentó más agua disponible que los tratamientos con cultivos de servicio (165 mm vs 108 mm). En el estadio V5-V6, los tratamientos con gramíneas tenían más agua disponible que aquellos con Vicia o Vicia+Avena. Estos autores encontraron que, en el principio de la floración, la cantidad de agua disponible fue variable, pero, en general, después de un CS gramínea hubo 35 mm más que luego de una leguminosa. Al momento de la cosecha todos los tratamientos presentaron el mismo contenido de agua. En cuanto a la Soja, el contenido de agua a la siembra varió según el CS antecesor, habiendo solo diferencias significativas entre el control, Vicia y Vicia+Avena. En R5 todos los tratamientos presentaron un contenido de agua similar y a la cosecha el suelo tenía entre 90 - 100 % de la capacidad de almacenar agua disponible.

En la misma línea, en un estudio realizado por Álvarez et al. (2017) se recopilaron 67 experimentos realizados en la región pampeana en los cuales se determinó el efecto de los CS en comparación a suelos en barbecho sobre distintas variables. Una de ellas era la disponibilidad de agua para la cual se encontró que en las capas superficiales (0 - 1m) del suelo no se detectaron diferencias significativas sobre la disponibilidad de agua. Sin embargo, cuando se consideraron las capas más profundas el contenido de agua fue menor. Hasta el metro de profundidad los CS no tuvieron un impacto significativo en el contenido de agua, pero cuando se consideró toda la zona de exploración de las raíces los cultivos siguientes presentaron menos agua disponible en comparación con

el barbecho. Estos mismos autores afirman que la adopción de los cultivos de servicio produjo una disminución promedio de entre 15 y 30% de agua disponible para la zona de exploración de las raíces, lo que representó una disminución entre 20 y 40 mm de agua en relación al tratamiento control. El mismo resultado fue encontrado por Rimski-Korsakov et al. (2015) en un estudio en el cual agruparon todos los ensayos que había en la provincia de la pampa húmeda sobre CS. En promedio, hallaron que a la siembra de los cultivos de renta la disminución en el contenido de agua disponible era de 21 mm.

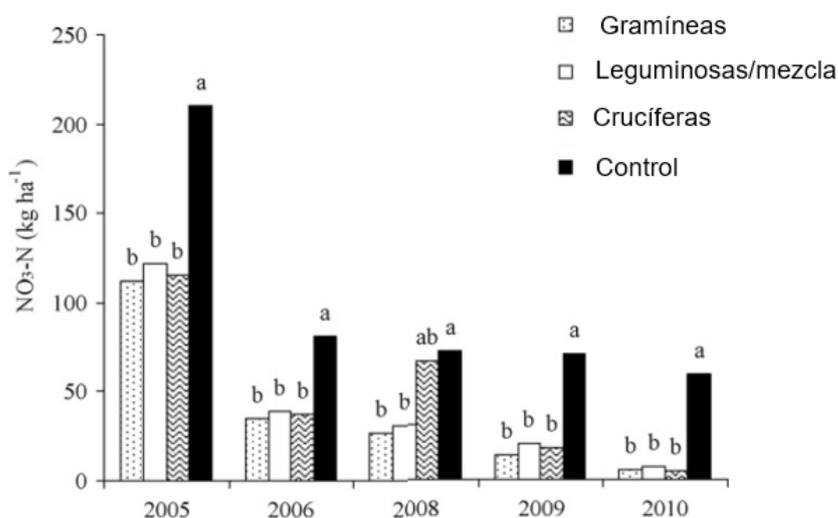
2.1.3 Disponibilidad de Nitrógeno

En un estudio realizado por Álvarez et al. (2017) se recopilaron 67 experimentos realizados en la región pampeana en los cuales se determinó el efecto de los CS en comparación a suelos en barbecho sobre distintas variables. Una de ellas fue el N-NO_3^- en suelo, el cual disminuyó en promedio un 53% a la siembra del cultivo siguiente (Maíz y Soja) producto de los cultivos de servicio. Esta caída se obtuvo tanto para los cultivos de especies gramíneas y leguminosas, la cual era mayor a medida que aumentaban los años con CS.

Siguiendo la misma línea, en un experimento realizado por Restovich et al. (2012) se evaluó la disponibilidad de N-NO_3^- en suelo en 5 años teniendo diferentes CS como antecesores y se comparó con un tratamiento control (Figura 1).

Figura 1

Contenido de N-NO_3^- en suelo (1m) al momento de la quema de los CS

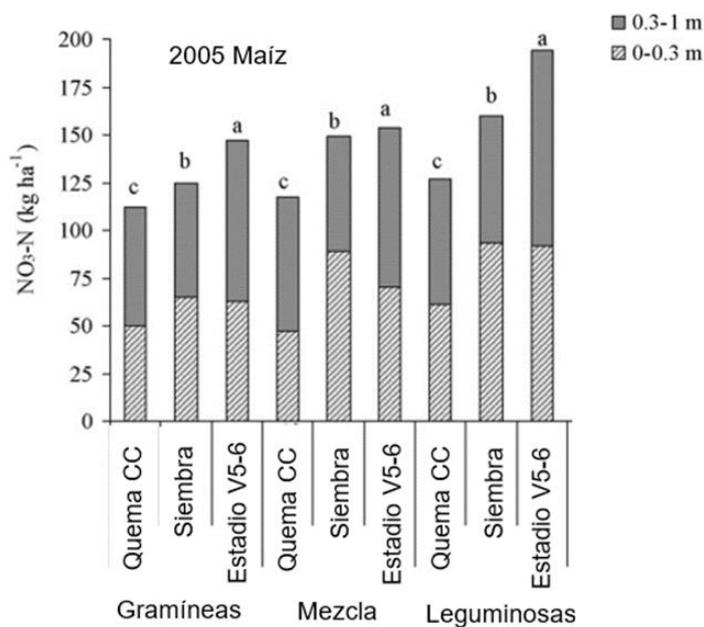


Nota. Tomado de Restovich et al. (2012).

Al momento de la quema de los CS, Restovich et al. (2012) encontraron que el contenido de N-NO_3^- en suelo en los tratamientos con CS fue entre 50-90% menor que en el control. Además, no se observaron diferencias significativas en el contenido de N-NO_3^- en suelo entre los distintos CS (misma letra). En promedio, el contenido de N-NO_3^- fue entre 40-95 kg mayor en el control que en los tratamientos con CS. Luego del 2006 se puede observar que la cantidad de N-NO_3^- fue menos de la mitad que para el año 2005.

Figura 2

Evolución del contenido de N-NO_3^- en suelo a dos profundidades para Maíz

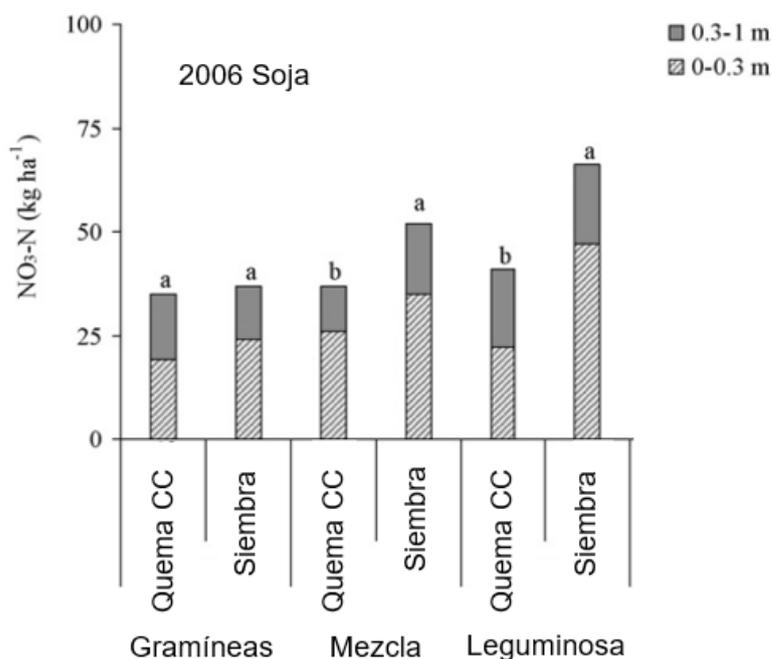


Nota. Tomado de Restovich et al. (2012).

Desde la fecha de finalización de los CS en 2005 hasta el estadio V5-6 se puede observar como todos los CS incrementaron el contenido de N-NO_3^- (Restovich et al., 2012).

Figura 3

Evolución del contenido de $N-NO_3^-$ en suelo a dos profundidades para Soja



Nota. Tomado de Restovich et al. (2012).

Desde la fecha de finalización de los CS en 2006 hasta la siembra de la Soja, se puede observar que todos los tratamientos excepto las gramíneas incrementaron el contenido de $N-NO_3^-$ en suelo (Restovich et al., 2012).

Tabla 2

Contenido de $N-NO_3^-$ en suelo para Maíz y Soja con diferentes CS como antecesores

Tiempo de evaluación	Avena	Vicia	Avena + Vicia	Control
Contenido de $N-NO_3^-$ en suelo				
2005 quema de los CS	117 b	127 b	117 b	210 a
Siembra Maíz	123 bc	160 b	149 bc	203 a
Maíz en V5-V6	141 b	194 a	155 b	195 a
Maíz en floración	102 a	113 a	104 a	107 a
Cosecha del Maíz				
F	60	89 ^a	22 ^a	50
NF	73	71	54	48
2006 quema de los CS	35 b	41 b	37 b	81 a
Siembra Soja	35 d	66 b	52 bcd	95 a
Soja en R5 (llenando grano)	42 a	46 a	51 a	52 a
Cosecha Soja	60 a	68 a	69 a	70 a

Nota. Letras diferentes dentro del mismo momento de evaluación indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos de CS. ^a Diferencias entre los tratamientos fertilizados (F) y no fertilizados (NF) para cada cultivo de servicio. Adaptado de Restovich et al. (2012).

Restovich et al. (2012) encontraron que, a la siembra del Maíz, el perfil de suelo presentó entre 43-90 kg de $\text{N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$ más en el tratamiento control que en los tratamientos con CS, no presentando diferencias significativas en el contenido de N-NO_3^- entre los distintos CS. En el estadio V5-6 el tratamiento control también presentó mayor contenido de N-NO_3^- excepto para la Vicia, con la cual no hubo diferencias significativas. En este estadio, la Vicia presentó mayor cantidad de N-NO_3^- que la Avena y la Mezcla (Avena+Vicia). Los autores mencionados anteriormente, hallaron que en floración no se observaron diferencias significativas para ninguno de los CS en cuanto al contenido de N-NO_3^- en suelo, siendo el contenido promedio de 100 kg $\text{N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$. A la cosecha del Maíz el contenido de N-NO_3^- varió según el antecesor y la fertilización, dando como resultado que el Maíz fertilizado después de la Vicia presentara 50 kg $\text{N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$ más que el tratamiento control y el resto de los CS.

A la siembra de la soja, el tratamiento control presentó mayor contenido de N-NO_3^- en suelo que los tratamientos con CS. En el momento de llenado de grano (R5) y a la cosecha todos los tratamientos presentaron un contenido similar de N-NO_3^- en suelo (Restovich et al., 2012).

2.1.4 Rendimiento de maíz y soja siguiendo diferentes cultivos de servicio

Rimski-Korsakov et al. (2015) hallaron que los CS podrían afectar el rendimiento de los cultivos de renta siguientes de manera positiva o negativa. En este sentido, los efectos positivos están explicados por la fijación biológica de N por los CS leguminosa, la disminución de malezas y plagas y una mejora en las propiedades físicas y químicas, mientras que, los efectos negativos están causados por la competencia por los recursos entre los CS y los cultivos de renta siguiente, principalmente por agua y nutrientes. De esta manera, estos autores afirman que el rendimiento de la soja con o sin CS no se vio afectado, en cambio, el maíz presentó en promedio una disminución del rendimiento, la cual es muy dependiente de qué tipo de CS se utilizó como antecesor. Si el CS antecesor era una leguminosa, el efecto en el rendimiento del maíz es positivo y cuando el CS era una gramínea el efecto sobre el rendimiento era negativo.

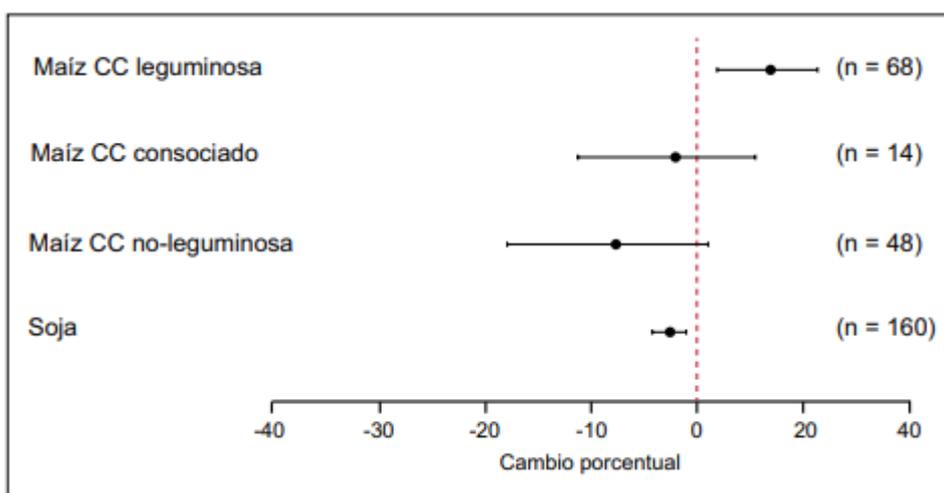
En relación con lo anterior, el rendimiento de Maíz luego de un CS depende del contenido de N-NO_3^- inicial a la siembra, el cual está directamente asociado con la relación C/N de los CS antecesores. Por lo que el rendimiento de Maíz se vio disminuido cuando la relación C/N de los cultivos antecesores aumentaba. De esta manera, el rendimiento de Maíz se redujo cuando el cultivo antecesor era una gramínea y no se vio afectado cuando el cultivo antecesor era una leguminosa (Vicia) o una Mezcla. Para el

caso de la Soja, no se observaron diferencias entre los CS antecesores en cuanto a rendimiento (Restovich et al., 2012).

Por otro lado, Álvarez et al. (2017) encontraron que el rendimiento de Soja prácticamente no se vio afectado por los CS a pesar de la reducción del N-NO_3^- y de la disponibilidad de agua. Por el contrario, el rendimiento de Maíz fue mayor cuando se utilizó Vicia como cultivo antecesor, el cual está asociado a un mayor aporte de N por la Vicia permitiendo una absorción adicional de $15 \text{ kg de N ha}^{-1}$. En cuanto a la utilización de CS gramíneas, si bien no fue significativa, hubo una disminución del rendimiento.

Figura 4

Cambio porcentual del rendimiento de maíz y soja entre los tratamientos con CS



Nota. Tomado de Álvarez et al. (2017)

Álvarez et al. (2017) afirman que tanto el rendimiento de Maíz como de Soja se vieron afectados por los CS (Figura 4). En Maíz se observaron diferencias significativas según el tipo de CS, mientras que la soja no se comportó de la misma manera. Cuando el Maíz presentó como CS antecesor una leguminosa (*Vicia* sp.), su rendimiento aumentó en promedio un 7%. En cambio, el rendimiento no fue afectado cuando se utilizaron mezclas (gramíneas + leguminosas) y fue negativamente afectado cuando los antecesores fueron cultivos no leguminosas (-8%). En cuanto al rendimiento de la soja, este fue mínimamente afectado por el CS antecesor y no se observaron diferencias significativas entre tipos de CS.

Por otro lado, en un meta análisis realizado por Miguez y Bollero (2005) encontraron que, en general, los CS gramíneas no incrementaron ni disminuyeron el rendimiento del Maíz. Estos autores afirman que, si bien los CS gramíneas no logran incrementar el rendimiento del Maíz, si son una buena opción en sistemas de cultivos luego de la cosecha de Maíz y antes de la siembra de un cultivo que no dependa de la fertilización

nitrogenada (Soja). Además, su inclusión en las rotaciones es beneficioso ya que mejoran las propiedades del suelo y reducen las pérdidas de nitrato (N-NO_3^-). En cuanto al rendimiento del Maíz, luego de un CS leguminosa este fue un 24% mayor que en el tratamiento sin CS. La variable que afectó significativamente la respuesta del Maíz al cultivo de servicio leguminosa fue la tasa de fertilización nitrogenada, la cual a medida que incrementaba, la respuesta en rendimiento disminuyó. Sin agregado de N, el Maíz luego de una mezcla rindió un 17% más que el tratamiento sin CS. Tanto para el CS mezcla y el CS gramínea, el rendimiento aumentó a medida que incrementó la tasa de fertilización nitrogenada, mientras que para los antecesores leguminosas disminuyó. Además, encontraron que el rendimiento de Maíz luego de CS de especies gramíneas fue comparable al tratamiento sin CS, resultado también encontrado por Tonitto et al. (2006).

2.2 EFECTO RESIDUAL DE LOS CS SOBRE EL CULTIVO POSTERIOR

2.2.1 Interferencia de los CS en malezas

Según Carr et al. (2020), la siembra de CS leguminosas presenta como ventaja frente a los no leguminosas la posibilidad de aumentar el nitrógeno disponible para las plantas debido a la fijación biológica de nitrógeno y a la baja relación C/N de los residuos. Esto provoca que esté disponible una gran cantidad de nitrógeno para los cultivos posteriores, aunque ciertas limitaciones como la terminación anticipada de estos cultivos y otros factores pueden limitar la oferta. Por otro lado, estos mismos autores hacen referencia a la incapacidad de los cultivos de servicio leguminosa para suministrar suficiente cantidad de nitrógeno disponible para satisfacer las necesidades de los cultivos. Esto puede ser un problema en los sistemas de labranza cero, ya que estas especies generalmente no producen suficiente biomasa para suprimir el crecimiento de malezas, lo que provoca que se deba incluir en los sistemas especies no leguminosas (gramíneas). Este último grupo incluye especies como raigrás o centeno, que son capaces de producir grandes cantidades de MS con altas relaciones C/N, provocando la inmovilización de N durante varias semanas después de su terminación.

2.2.2 CS en siembra asociada

Bergkvist et al. (2011) encontraron que el rendimiento en grano de trigo se vio incrementado cuando se aumentó las dosis de N, pero no fue significativamente afectado por los CS sembrados debajo. La biomasa producida por los CS a la cosecha del trigo fue mayor cuando especies de leguminosas (tréboles) eran incluidas como CS y cuando no se fertilizó con nitrógeno el trigo. A su vez, los autores afirman que la biomasa producida por las leguminosas (tréboles) disminuía en la medida que se

incrementaba las dosis de N, mientras que el crecimiento de las gramíneas (raigrás) no se vio afectado por la fertilización, resultando en un aumento del raigrás en la mezcla a medida que aumentaba la dosis de N. A pesar de que las diferencias fueron mínimas en la producción de biomasa para el raigrás debido a las dosis de N, la producción de biomasa a dosis bajas y medias de fertilizante fue significativamente mayor que cuando no se aplicó N. La biomasa de los CS de trébol al momento de su incorporación fue el doble cuando no se aplicó N al trigo que cuando se aplicó $120 \text{ kg de N ha}^{-1}$, mientras que la dosis de N no afectó significativamente la cantidad de N incorporado cuando el CS era una gramínea pura (raigrás).

2.2.3 Nitrógeno aportado al suelo por los residuos de leguminosas y sus consecuencias sobre las recomendaciones de N

Liu et al. (2024) encontraron que, en general, la biomasa aérea producida por las leguminosas fue comparable o mayor a la producida por trigo, siendo una leguminosa (garbanzo) la que presentó la mayor producción de biomasa por encima de la superficie del suelo y, en consecuencia, el mayor contenido de nitrógeno sobre la superficie del suelo. Más allá de que cultivo se trate, el contenido de N devuelto al suelo como residuo subterráneo fue menor que el N devuelto como residuo de la biomasa por encima de la superficie del suelo, siendo una leguminosa (garbanzo) la que aportó mayor contenido de biomasa por debajo de la superficie del suelo.

A su vez, los mismos autores mencionados anteriormente indican que sigue siendo la misma leguminosa la que produjo la mayor cantidad de biomasa por debajo del suelo, mientras que el trigo fue una de las especies que rindió menos. Las leguminosas generalmente retornaron mayor cantidad de N total (biomasa superficial + biomasa subterránea) al suelo en comparación con el trigo. Por otro lado, determinaron que el trigo sembrado luego de una lenteja o arveja requirió menos fertilizante nitrogenado para poder lograr el rendimiento objetivo que el trigo sembrado luego de otras especies leguminosas (garbanzo, haba) y trigo.

2.2.4 Rendimiento del trigo, biomasa y composición de los CS, agotamiento del nitrógeno mineral del suelo y efecto residual de los CS.

Siguiendo la misma línea, Bergkvist et al. (2011) encontraron que los cultivos de servicio agotaron el contenido de nitrógeno mineral del suelo en el horizonte superficial del suelo (0 - 30 cm) de manera más eficiente que en los horizontes más profundos a altas dosis de N que a bajas dosis, pero el contenido de nitrógeno mineral era similar a ambas dosis de N. Todos los cultivos de servicio, excepto el trébol blanco, disminuyeron el contenido

de nitrógeno mineral en los horizontes más profundos (30 - 90 cm) a la dosis más altas de N. El efecto residual de los cultivos de servicio compuestos por mezclas (gramínea + leguminosa) casi se igualó a los efectos de los cultivos de servicio compuestos exclusivamente por leguminosas cuando no se aplicó fertilizante (N), pero los efectos positivos que aportan las mezclas se vieron disminuidos cuando la dosis de N incrementaba. Con las dosis más altas (120 – 180 kg N), los tratamientos compuestos por trébol blanco y trébol rojo puro tendieron a presentar un mayor efecto en el rendimiento del trigo en comparación a las mezclas. A su vez, estos autores hallaron que el rendimiento de la cebada en los tratamientos en los cuales no se aplicó N al trigo anterior (trébol blanco y trébol rojo), fue en promedio 1,9 – 2,4 Mg MS ha⁻¹ mayor que los tratamientos que no contenían estas especies. A pesar de que los efectos positivos de los cultivos de trébol en el rendimiento de la cebada disminuyeron cuando las dosis de N del trigo anterior incrementaron, el rendimiento de la cebada cuando se aplicó 180 kg N ha⁻¹ fue en promedio 1 Mg MS ha⁻¹ mayor con tréboles puros que sin cultivos de servicio sembrados debajo. No se observó una correlación entre el rendimiento del trigo y el rendimiento del cultivo posterior (cebada), pero si se encontró una correlación positiva entre el rendimiento de cebada y la cantidad de biomasa aérea de los cultivos de servicio. Aun así, el factor que se correlacionó de forma más fuerte con el rendimiento de cebada fue el contenido de N de la biomasa aérea de los cultivos de servicio cuando estos se incorporaron.

2.3 EFECTO RESIDUAL DE LOS CS SOBRE LA SECUENCIA

Según Ambrosini et al. (2022) los sistemas de cultivo diversificados pueden beneficiar el crecimiento y rendimiento de los cultivos. En este sentido, los autores mencionados anteriormente realizaron un experimento con una duración de 4 años que consistió en cinco sistemas de cultivo bajo siembra directa con un aumento en la proporción de Maíz en el verano (0%, 25%, 33%, 50% y 100%). Estas proporciones consistían en cultivar Soja o Maíz todos los años en el verano y en el invierno, dependiendo la secuencia, se sembraba solo cebada cuando el sistema era un monocultivo de Soja o Maíz o cebada, trigo, canola, avena o rábano forrajero cuando la secuencia tenía una proporción 75-25% de Soja-Maíz, siendo este el sistema de rotación más diverso. Estos autores, al considerar la diversidad de los cultivos dentro del sistema, encontraron que el rendimiento en grano incrementaba 33% para la cebada y 52% para el Maíz cuando el coeficiente de diversidad aumentaba de 1,4 a 4,9. A diferencia de los cereales, el rendimiento de soja no fue afectado por la diversificación del sistema, pero presentó un incremento del 10% en rendimiento cuando aumentó la proporción de Maíz en la secuencia, de 0 a 47%.

En un trabajo realizado por Lupwayi y Soon (2016) se evaluó los efectos en la rotación de cultivos leguminosas relacionados al nitrógeno sobre tres cultivos posteriores consecutivos (trigo, canola y cebada) sembrados en tres años distintos: 2008, 2009 y 2010, respectivamente. Estos autores encontraron que todos los residuos de las especies de leguminosas incrementaron la absorción de N, la acumulación de C y los rendimientos del primer cultivo evaluado (trigo), sin diferencias significativas entre residuos (residuo de cultivo para abono verde y residuo de leguminosa). Con respecto al segundo cultivo (canola), estos autores afirman que su comportamiento fue similar al primer cultivo y en cuanto al tercer cultivo (cebada), los residuos de leguminosa incrementaron más la absorción de N, la acumulación de C y los rendimientos en comparación con los residuos de abonos verdes. Además, la remoción de los residuos de leguminosas de la superficie del suelo no tuvo efectos sobre la respuesta de los cultivos posteriores, a pesar de que algunos de los residuos liberaban mayor cantidad de N al suelo en comparación con otros, dejando en evidencia la contribución de N por parte de las raíces de las leguminosas y los rizo depósitos que permitieron compensar el N aportado por los residuos aéreos.

A su vez, Lupwayi y Soon (2016) encontraron que el rendimiento del trigo en una secuencia de dos años de leguminosa-trigo fue significativamente impactado por el cultivo antecesor (residuo del cultivo) en la secuencia. El rendimiento en grano fue generalmente mayor cuando el cultivo antecesor al trigo fue una leguminosa que cuando la secuencia fue trigo-trigo, aunque la diferencia fue significativa ($P \leq 0.05$) solo con dos especies de leguminosas (lenteja y arveja), siendo el rendimiento en grano 25% mayor cuando los cultivos antecesores eran las leguminosas mencionadas anteriormente. Esto se vio reflejado, según los autores mencionados anteriormente, también en la producción de biomasa total por encima de la superficie del suelo, siendo un 19% mayor cuando el cultivo antecesor al trigo fue una leguminosa (arveja o lenteja) que cuando la secuencia fue trigo-trigo. El trigo sembrado sobre rastrojo de trigo produjo grano con valores de nitrógeno entre 30 y 40% más bajos que cuando la secuencia fue leguminosa-trigo.

Según Lupwayi y Soon (2016), la producción de biomasa sobre la superficie del suelo (grano + paja) de trigo no fue afectada por el tipo de residuo de la especie de cultivo de leguminosa anterior sobre el cual el trigo fue sembrado. Sin embargo, el trigo sembrado luego de una lenteja y arveja obtuvo un rendimiento en grano un 25% superior que el rendimiento de la secuencia trigo-trigo. Además, ciertos estudios realizados en primavera, demostraron que la lenteja y la arveja proporcionaron una cantidad mayor de N que las otras especies leguminosas, y, por lo tanto, menor fertilizante nitrogenado ($17 - 45 \text{ kg N ha}^{-1}$) se requirió para el trigo sembrado luego de estas especies (lenteja y

arveja) en comparación con el nitrógeno requerido para el resto de las especies leguminosas ($50 - 65 \text{ kg N ha}^{-1}$). Estos autores encontraron que el trigo sembrado luego de estas leguminosas (lenteja y arveja) presentó mayor producción de rendimiento en grano, lo que implica que estas especies aportan suficiente nitrógeno disponible para las plantas al siguiente cultivo en la rotación, lo cual compenso la reducida cantidad de fertilizante nitrogenado aplicado. Más allá de esto, hay otras fuentes de N que contribuyeron sustancialmente a la producción de grano de trigo y al rendimiento de N en grano, siendo la biomasa por debajo de la superficie del suelo la fuente predominante de N para el trigo. Los residuos de biomasa por debajo de la superficie del suelo de lenteja y arveja proporcionaron entre un 82 – 91% del N presente en grano y el resto de los residuos de las leguminosas presentes entre un 70 – 86%. Estas diferencias se pueden explicar, parcialmente, por los exudados que producen las distintas especies de leguminosas mencionadas anteriormente, lo cual podría estar explicando las diferencias observadas en la disponibilidad de N.

En la misma línea, Liu et al. (2020) realizaron un estudio el cual consistió de tres rotaciones de leguminosa-trigo: garbanzo-trigo, lenteja-trigo y arveja-trigo y una referencia de monocultivo de trigo (trigo-trigo). Las secuencias de dos años mencionadas anteriormente fueron mantenidas por cuatro ciclos durante 8 años. Estos autores encontraron que el rendimiento en grano era afectado por el cultivo leguminosa antecesor, siendo el rendimiento de trigo mayor cuando los cultivos antecesores eran lenteja o arveja que cuando era un monocultivo de trigo. A lo largo de las 4 fases con trigo, el rendimiento del mismo fue entre 8-27 y 5-28% mayor cuando sus antecesores eran arveja y lenteja, en comparación con el monocultivo de trigo, respectivamente. En cuanto al aporte de N procedente de los residuos de los cultivos, este fue afectado por el tipo de rotación y el año. El ingreso de N a través de los residuos de los cultivos a lo largo de los 8 años para la secuencia trigo-trigo fue similar o significativamente menor que aquellas secuencias que presentaban leguminosas, siendo el ingreso de N a través de los residuos de arveja un 12-70% mayor que el ingreso de N a través de los residuos de garbanzo.

A su vez, los ingresos acumulativos de N de los residuos durante los ocho años de duración del estudio fueron afectados por el tipo de rotación. En este sentido, los ingresos acumulativos de N de los residuos en la rotación trigo-trigo fue un 9, 26 y 36% menor que en las rotaciones garbanzo-trigo, lenteja-trigo y arveja-trigo, respectivamente. Además, encontraron que el ingreso de N a través de los residuos en las tres rotaciones con leguminosas fue mayor (33%) que en el monocultivo de trigo (Liu et al., 2020).

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 CARACTERÍSTICAS EXPERIMENTALES

3.1.1 Localización

El experimento se realizó en la Estación Experimental “Dr. Mario A. Cassinoni” situada en la ruta 3 en el km 363, a 8 km al sur de la ciudad de Paysandú (latitud: 32°22'39.23" Sur y longitud: 58°02'41.37" Oeste).

3.1.2 Tipo de suelo e historia de la chacra

La chacra se encuentra sobre la Unidad San Manuel, cuyos suelos dominantes son Brunosoles Eútricos Típicos. Integra el Grupo CONEAT 10.9 con un índice de productividad de 150.

El trabajo de campo se realizó entre mayo 2023 y noviembre 2023. En la siguiente tabla, se esquematiza la secuencia de cultivos de la chacra, en donde se realiza un sistema de rotación bajo siembra continua (Tabla 3).

Tabla 3

Secuencia de cultivos de la chacra

Zafra	Ver	Inv	Ver	Inv	Ver	Inv
Año	2020-2021	2021	2021-2022	2022	2022-2023	2023
Cultivo	Pradera/Soja	Colza	Soja	T1: Barbecho T2: Avena byzantina T3: Vicia villosa T4: Avena + Vicia	Maíz	Cebada
				T1: Barbecho T2: Avena byzantina T3: Vicia villosa T4: Avena + Vicia	Soja	

3.1.3 Diseño experimental y modelo estadístico

En el invierno del 2022 se instaló un experimento en bloques completos al azar con tres repeticiones para evaluar el comportamiento de cuatro alternativas de cultivos de servicio invernales: Barbecho sin cultivo de servicio (Barbecho), (*Avena byzantina*) (Avena), una leguminosa (*Vicia villosa*) (Vicia) y la Mezcla de Avena+Vicia (Mezcla) (Pereyra Grecco & Morán Vallejo, 2024). En el verano 2022/23 se evaluó el efecto residual de estos manejos sobre el cultivo de verano siguiente. Para ello, se instalaron dos experimentos independientes, sembrados sobre los manejos de barbecho invernal (Bentancor Salvo & Ferreira Larrosa, 2024). Para el caso de maíz, el diseño corresponde a parcelas divididas en bloques al azar con tres repeticiones, ubicándose los cultivos de

servicios invernales como parcela mayor y dos manejos de la fertilización con nitrógeno, testigo sin fertilizar y fertilizado con 40 kg de N al estadio V6 de maíz en parcela menor. En el caso de soja, se mantuvo el diseño original de bloques al azar con tres repeticiones. Para ambos experimentos, se realizó un análisis de varianza (ANAVA) utilizando el software InfoStat. Luego de realizado el ANAVA, se aplicó la prueba de comparaciones múltiples (LSD Fisher), con un nivel de significancia de 5%.

En el invierno 2023 se sembró cebada sobre el rastrojo de los dos cultivos de verano, manteniendo el diseño experimental y los tratamientos generados en verano del 2023.

Por tanto, el análisis de los resultados se realiza con un diseño experimental correspondiente a parcelas divididas en bloques completos al azar en cebada sembrada posterior a Maíz y un diseño en bloques completos al azar para cebada posterior a soja.

El tamaño de parcela mayor (antecesor Maíz) fue de 16,8 m² (4,2*4 m) y el de la parcela menor, 8,4 m² (2,1*4 m). En el caso del antecesor Soja, el tamaño de la parcela fue igual al de la parcela mayor del antecesor Maíz.

El modelo estadístico utilizado para el análisis de resultados sobre antecesor Maíz fue:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_k + \beta_{\tau_{ik}} + N_j + (\tau N)_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

Donde Y_{ijk} son las variables de respuesta estudiadas, μ la media poblacional, τ_i el efecto antecesor invierno, β_k el efecto de los bloques, $\beta_{\tau_{ik}}$ el error experimental de la parcela mayor (Barbecho), N_j el efecto de la fertilización nitrogenada, $(\tau N)_{ij}$ el efecto de la interacción barbecho x fertilización nitrogenada y ϵ_{ijk} el error B de la subparcela fertilización nitrogenada y de la interacción.

Para los resultados sobre antecesor soja, el modelo estadístico utilizado fue:

$$Y_{ik} = \mu + \tau_i + \beta_k + \epsilon_{ik}$$

Donde Y_{ik} son las variables de respuesta estudiadas, μ es la media poblacional, τ_i es el efecto de los tratamientos, β_k es el efecto de los bloques y ϵ_{ik} es el error experimental.

3.2 MANEJO Y DETERMINACIONES EN EL CULTIVO DE CEBADA

3.2.1 Manejo del barbecho y siembra del cultivo de cebada

El cultivo de Maíz y el cultivo de Soja no se cosecharon debido a las condiciones climáticas del año, caracterizado por el déficit hídrico.

El manejo del barbecho consistió en mantenerlo libre de malezas con la aplicación de 4 l/ha de glifosato 15 días previos a la siembra y una aplicación de 2,5 l/ha de paraquat el día de la siembra. El cultivo de cebada se fertilizó siguiendo los criterios establecidos por Hoffman et al. (2010) el 29 de agosto cuando se encontraba en el estadio Z3.0 y solo se aplicó sobre rastrojos de Maíz en los siguientes tratamientos: Avena y Mezcla: 80 kg de urea azufrada y Barbecho y Vicia: 40 kg de urea azufrada.

La siembra de la cebada se realizó el 14 de junio de 2023 utilizando la variedad Arrayán, con una sembradora de siembra directa SEMEATO SH 13 a una densidad de siembra de 100 kg/ha, buscando una población objetivo de 184 plantas/m² (Miralles et al., 2014).

3.2.2 Determinaciones de suelo

Se realizaron muestras compuestas de suelo con el objetivo de determinar la concentración de nitratos en suelo en tres momentos distintos: el 19 de mayo: previo a la siembra, el 15 de junio a la siembra y el 19 de julio cuando el cultivo de cebada estuvo en el estado fenológico Z2.2 (Escala Zadocks), presentando los tres muestreos 30 días aproximadamente entre ellos. En cebada con antecesor maíz, los muestreos corresponden a las parcelas testigo sin fertilizar. Para esto, se recolectaron 6 submuestras por parcela, con un calador a dos profundidades: 0-7,5 cm y 7,5-15 cm y se colocaron en bolsa para su siguiente secado en estufa a 60°C durante 48 horas. Se molieron, pasando por una malla de 2 mm para posteriormente realizar la determinación de la concentración de N-NO₃⁻, la cual se realizó utilizando un electrodo ORION.

3.2.3 Determinaciones en el cultivo

3.2.3.1 Producción de biomasa y su concentración de nitrógeno 55 días post siembra

La producción de biomasa 55 días post siembra se realizó a través de la técnica de doble muestreo. Para ello se utilizó un disco medidor para medir altura y densidad de la biomasa producida en función de la presión ejercida por el disco sobre el cultivo. La altura del forraje sobre el suelo se mide por el eje central, que tiene una escala graduada. Se cuantificó la altura (cm) en 10 puntos al azar dentro de la parcela para cebada con antecesor Soja y con antecesor Maíz. Luego de realizado el muestreo, se identificaron sitios representativos del rango cuantificado en cada experimento, determinando su altura y realizando un corte de la biomasa a ras del suelo de un cuadro de 30x30 cm.

Cada muestra se secó a estufa, a 60°C durante 48 horas y posteriormente se registró el peso seco con el objetivo de elaborar una escala que permita estimar una función lineal que relacione la altura con la producción de biomasa en función de los valores de altura más frecuentes. Se determinaron 5 rangos de altura: 2-4 cm; 8-10 cm; 14-16 cm; 20-22 cm y 28-30 cm. (Anexo). La concentración de nitrógeno en planta (Kjeldahl), se cuantificó sobre una muestra de planta tomada de cada parcela y la absorción de N multiplicando la biomasa estimada por el % de N en planta medido.

3.2.3.2 Número de plantas y número de tallos por metro cuadrado 58 días post siembra

Para su realización, se utilizó una regla de un metro de largo con el objetivo de contar el número de plantas y el número de tallos/planta en dos metros lineales en dos surcos consecutivos. Esto se realizó en cada parcela en dos puntos diferentes elegidos al azar en soja y en cada sub parcela para maíz.

3.2.3.3 Número de espigas por metro cuadrado

El número de espigas se cuantificó en dos metros lineales en dos surcos consecutivos. Esto se realizó en cada parcela en dos puntos diferentes elegidos al azar en soja y en cada sub parcela para maíz.

3.2.3.4 Producción de biomasa y concentración de N a Z5.5

Para estimar la producción de biomasa y N absorbido a Z 5.5 también se siguió la técnica de doble muestreo, pero la variable utilizada para estimarla fue el peso de los tallos. Se cortó una muestra de 10 tallos, registrando su peso seco y concentración de N en planta. Para esto se pesaron todas las muestras en fresco y se ingresaron a estufa a 60°C durante 48 horas y se pesaron en seco. Luego todas las muestras se pasaron por un molino de forraje para posteriormente determinar el % de N en planta. Para maíz, esto se realizó en las dos subparcelas: fertilizada y testigo y en soja en cada parcela en dos puntos elegidos al azar.

No se logró ajustar una función que relacione el peso de tallos con la producción de biomasa, por lo que no fue posible estimarla.

3.2.4 Rendimiento en grano de cebada

Se determinó el rendimiento en grano (kg) a partir de la trilla realizada el 20 de noviembre de 2023 en una cosechadora experimental de las parcelas delimitadas tanto para maíz (fertilizada y testigo) como para Soja. Luego de la cosecha, se procedió a medir el largo de las parcelas con el objetivo de poder determinar posteriormente el rendimiento. En el laboratorio, se pesó lo que se cosechó de cada parcela de Maíz y

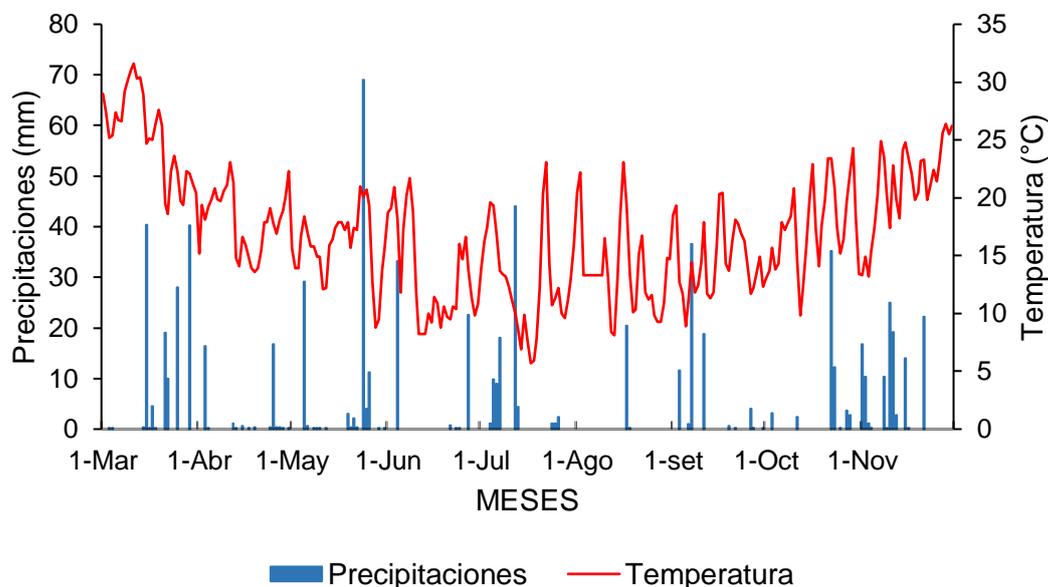
Soja y con un humidímetro se midió la humedad. Posteriormente, se tomó de cada bolsa una muestra de 300 gr con el fin de realizar calidad de grano. Para esto se utilizó una clasificadora de grano, la cual presentaba 3 tamices: 2,8 mm, 2,5 mm y 2,2 mm y, por último, se pesaron 100 granos para estimar el peso de 1000 granos.

4 RESULTADOS

4.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

Figura 5

Precipitaciones y temperatura registradas en la EEMAC durante el período en estudio (01/03/2023 al 30/11/2023)



Nota. O. Ernst (Comunicación personal, 5 de noviembre, 2024)

Para el período de evaluación, las condiciones climáticas fueron predisponentes para un correcto crecimiento y desarrollo de los cultivos de invierno. Esto se refleja en la temperatura media durante la fase vegetativa, siendo de 13°C. Por otro lado, las condiciones de temperatura y radiación para el período de llenado de grano fueron de 17 °C y de 23 MJ m⁻² día⁻¹, siendo el cociente fototermal para el período crítico de definición del rendimiento de 1,4. Con respecto a las precipitaciones acumuladas, el período de crecimiento de los cultivos invernales se caracterizó por presentar un acumulado promedio de 351 mm.

4.2 EFECTO RESIDUAL DE LOS CULTIVOS DE SERVICIO SOBRE EL APORTE DE NITRÓGENO DESDE EL SUELO

Los resultados de esta sección se presentan solo para el efecto CS previo, ya que hasta 55 días post siembra no se cuantificó el efecto diferencial de la fertilización nitrogenada en cebada con antecesor maíz (Tablas 4, 5 y 6).

4.2.1 CONCENTRACIÓN DE $N-NO_3^-$ EN SUELO CON MAÍZ COMO CULTIVO ANTECESOR DE VERANO

Tabla 4

Concentración de $N-NO_3^-$ ($mg\ kg^{-1}$) en dos profundidades de suelo para cebada

Profundidad	Cultivo de servicio	Presiembra 19/5/2023	Siembra 15/6/2023	Macollaje 19/7/2023
0 - 7,5 cm	Barbecho	20 b	18 ab	7 ab
	Av. Byzantina	17 b	15 b	3 b
	Vicia villosa	56 a	26 a	14 a
	Av. Byzantina + Vicia villosa	24 b	18 ab	5 b
7,5 - 15 cm	Barbecho	20 b	11 b	8 b
	Av. Byzantina	9 c	8 b	4 b
	Vicia villosa	34 a	19 a	18 a
	Av. Byzantina + Vicia villosa	20 b	12 b	7 b

Nota. Medias con una letra común no difieren significativamente entre si dentro de fechas de muestreo ($p \leq 0,05$).

Se encontraron diferencias significativas en la concentración de $N-NO_3^-$ ($p \leq 0,05$) atribuibles a los cultivos de servicio (CS) en presiembra para la variable estudiada. En cuanto a los primeros centímetros de suelo, Vicia presentó la mayor disponibilidad de $N-NO_3^-$ y el resto de los tratamientos no se diferenciaron significativamente. En tanto, en el horizonte más profundo (7,5 – 15 cm) Vicia siguió siendo el tratamiento con mayor disponibilidad y la Avena presentó la menor disponibilidad, no encontrándose diferencias significativas entre el Barbecho y la Mezcla.

A la siembra, se encontraron diferencias significativas entre Avena y Vicia en los primeros centímetros de suelo, no diferenciándose significativamente el resto de los tratamientos. En cuanto a los centímetros de suelo más profundos, el único tratamiento que presentó diferencias significativas fue Vicia, siendo este el de mayor contenido de $N-NO_3^-$.

En macollaje de cebada (Z2.2), se puede observar que, en los centímetros más superficiales, el Barbecho no presentó diferencias significativas con el resto de los tratamientos. Sin embargo, Vicia presentó mayor disponibilidad de nitrato en suelo con respecto a la Mezcla y la Avena. En cuanto al horizonte más profundo Vicia presentó mayor disponibilidad de $N-NO_3^-$, siendo el único tratamiento que presentó diferencias significativas.

4.2.2 CONCENTRACIÓN DE $N-NO_3^-$ EN SUELO TENIENDO COMO CULTIVO DE VERANO ANTECESOR SOJA

Tabla 5

Concentración de $N-NO_3^-$ ($mg\ kg^{-1}$) en dos profundidades de suelo para cebada

Profundidad	Cultivo de servicio	Presiembra 19/5/2023	Siembra 15/6/2023	Macollaje 19/7/2023
0 -7,5 cm	Barbecho	27 a	18	8 ab
	Av. Byzantina	8 b	11	4 b
	Vicia villosa	39 a	17	8 ab
	Av. Byzantina + Vicia villosa	23 ab	20	9 a
7,5 - 15 cm	Barbecho	35	14	13 a
	Av. Byzantina	9	7	4 b
	Vicia villosa	38	12	10 ab
	Av. Byzantina + Vicia villosa	18	13	10 a

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes dentro de fecha de muestreo ($p \leq 0,05$).

Se encontraron diferencias significativas en presiembra en la disponibilidad de $N-NO_3^-$ entre tratamientos en los centímetros más superficiales de suelo. La Avena se diferenció del Barbecho y Vicia. En tanto, en los centímetros más profundos no se observaron diferencias significativas entre tratamientos.

A la siembra, no se encontraron diferencias significativas en la disponibilidad de $N-NO_3^-$ entre tratamientos en los centímetros más superficiales de suelo. Por otro lado, en el horizonte más profundo, tampoco se presentaron diferencias significativas.

En macollaje, en el horizonte más superficial, los únicos tratamientos que presentaron diferencias significativas son la Mezcla (Avena + Vicia) y Avena. En el horizonte más profundo, el Barbecho y la Mezcla presentaron diferencias significativas en el contenido de $N-NO_3^-$ con respecto a la Avena.

4.3 EFECTO RESIDUAL EN CEBADA SEGÚN CULTIVO DE SERVICIO PREVIO A MAÍZ COMO CULTIVO ANTECESOR DE VERANO

4.3.1 PRODUCCIÓN DE BIOMASA, ABSORCIÓN DE N 55 DÍAS POST SIEMBRA Y PORCENTAJE DE N A ESPIGAZÓN SEGÚN CULTIVO DE SERVICIO Y FERTILIZACIÓN

Los resultados se presentan 55 días post siembra sólo como respuesta a los CS porque no se cuantificó las diferencias en la fertilización nitrogenada (subparcelas) aplicada al maíz. Los datos que se muestran corresponden a la parcela testigo (Tabla 6) y a Z 5.5 como respuesta en concentración de N a CS y fertilización (N), ya que la interacción CS*N fue no significativa ($p \leq 0,05$) (Tabla 7).

Tabla 6*Biomasa producida y kg de N absorbido por cebada 55 días post siembra*

Cultivo de servicio	Biomasa (kg ha⁻¹)	kg de N absorbido (kg ha⁻¹)
Barbecho	1152 ab	61 a
Av. Byzantina	937 b	42 b
Vicia villosa	1238 ab	73 a
Av. Byzantina + Vicia villosa	1460 a	75 a

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$).

En cuanto a la producción de biomasa, sólo se observó diferencias entre la Mezcla y Avena, el resto de los tratamientos no se diferenciaron. Con respecto a los kg de N absorbidos por cebada, el único tratamiento que se diferenció con los demás fue Avena, presentando la menor cantidad de N absorbido.

Tabla 7*Porcentaje de N a espigazón según CS y fertilización nitrogenada (N)*

Cultivo de servicio	% de N a espigazón	
Barbecho	1,40 bc	
Av. Byzantina	1,29 c	
Vicia villosa	2 a	
Av. Byzantina + Vicia villosa	1,65 b	
N	Testigo	1,54
	Fertilizado	1,63

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$).

No existió interacción CSxN significativa entre cultivo de servicio.

Se encontraron diferencias significativas en el porcentaje de N a espigazón entre CS. El tratamiento que presentó mayor contenido de N y que se diferenció del resto fue Vicia. El Barbecho no se diferenció de la Avena ni de la Mezcla, pero la Mezcla si presentó diferencias con la Avena.

4.3.2 COMPONENTES NUMÉRICOS DEL RENDIMIENTO EN GRANO

No se observaron diferencias significativas (p -valor N° plantas/m²: 0,54, N° macollos/m²: 0,85, N° espigas/m²: 0,62) para la interacción CSxN para ninguna de las variables.

Tabla 8

Número de plantas/m², macollos/m² y espigas/m² de Cebada según CS y fertilización nitrogenada (N)

Cultivo de servicio		Plantas/m ²	Macollos/m ²	Espigas/m ²
Barbecho		44	443 ab	548
Av. Byzantina		53	302 b	445
Vicia villosa		42	479 a	522
Av. Byzantina + Vicia villosa		48	422 ab	397
N	Testigo	39 b	342 b	484
	Fertilizado	54 a	481 a	472

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$).

En cuanto a la fertilización nitrogenada (N), se evidenciaron diferencias significativas entre el tratamiento testigo y el fertilizado para las plantas/m² y los macollos/m², pero no para las espigas/m². Con respecto a los cultivos de servicio, la única variable que presentó diferencias fue los macollos/m², siendo Avena y Vicia los únicos tratamientos en los que se observó diferencias.

4.3.3 RENDIMIENTO Y CALIDAD FÍSICA DE GRANO

No hubo diferencias significativas (p -valor: 0,46) entre CS utilizados sobre el rendimiento en grano. En cuanto a la calidad física comercial del grano producido, se encontraron diferencias entre cultivos de servicio (p -valor 2,8 mm: 0,004; p -valor 2,8 + 2,5 mm: 0,010; p -valor 2,5 mm: 0,005; p -valor 2,2 mm: 0,03), sin interacción con fertilización nitrogenada. Por tanto, en la Tabla 9 se presenta la respuesta en rendimiento en grano y calidad física a los CS y en la Tabla 10 a los CS y fertilización con N.

Tabla 9

Rendimiento en grano de cebada y calidad física de grano cuantificada como tamaño

Cultivo de servicio	Tamaño de grano				Rendimiento (kg ha ⁻¹)
	2,8 mm	2,8 + 2,5 mm	2,5 mm	2,2 mm	
Barbecho	61 b	89 ab	28 b	6 bc	4105
Av. Byzantina	75 a	94 a	19 c	3 c	3684
Vicia villosa	43 c	83 c	41 a	11 a	4425
Av. Byzantina + Vicia villosa	54 bc	87 bc	33 ab	9 ab	4438

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$).

Para cebada de primera (2,8 mm), Avena se diferenció significativamente del resto de los CS, presentando un mayor porcentaje de granos de primera. El Barbecho y Vicia presentaron diferencias entre ambos, pero el Barbecho y la Vicia no presentaron diferencias con la Mezcla. En cuanto al tamaño con valor comercial de referencia (tamaño > 2,5 mm), Avena no presentó diferencias con el Barbecho, pero si se observó diferencias con Vicia y la Mezcla. A su vez, la Mezcla no se diferenció del Barbecho ni de Vicia. Con respecto a la cebada de segunda (2,5 mm), la Mezcla no presentó

diferencias con el Barbecho y Vicia, pero Vicia si se diferenció de Avena y el Barbecho. También hay diferencias entre el Barbecho y Avena. En cuanto a la cebada de tercera (2,2 mm), la Mezcla no se diferenció significativamente de Vicia y el Barbecho, pero si presentó diferencias con la Avena. La Avena no presentó diferencias con el Barbecho, pero si se diferenció de la Mezcla y Vicia.

En cuanto a peso de grano, no hubo interacción significativa (p -valor = 0,55).

Tabla 10

Peso de mil granos según interacción CS x fertilización y fertilización nitrogenada

Cultivo de servicio	Fertilización	Peso de mil granos (g)
Barbecho	Testigo	43 b
	N	42 bc
Av. Byzantina	Testigo	46 a
	N	46 a
Vicia villosa	Testigo	41 cd
	N	39 de
Av. Byzantina + Vicia villosa	Testigo	41 cd
	N	39 e
N	Testigo	43 a
	Fertilizado	42 b

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$).

La interacción significativa estuvo determinada debido a que, si bien luego de Barbecho y Avena no hubo efecto significativo sobre el peso de grano, los dos tratamientos de CS compuestos por leguminosas (Vicia y Mezcla) lo redujeron.

4.4 EFECTO RESIDUAL EN CEBADA SEGÚN CS PREVIO A SOJA COMO CULTIVO ANTECESOR DE VERANO

4.4.1 PRODUCCIÓN DE BIOMASA, ABSORCIÓN DE N 55 DÍAS POST SIEMBRA Y PORCENTAJE DE N A ESPIGAZÓN SEGÚN CS

Tabla 11

Biomasa producida y absorción de N por cebada 55 días post siembra

Cultivo de servicio	Biomasa (kg ha⁻¹)	kg de N absorbido (kg ha⁻¹)
Barbecho	1506 ab	86 ab
Av. Byzantina	1334 b	69 b
Vicia villosa	1485 ab	81 ab
Av. Byzantina + Vicia villosa	1735 a	98 a

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$).

En cuanto a la producción de biomasa, sólo se observó diferencias entre Avena y Mezcla, el resto de los tratamientos no se diferenciaron. Con respecto a los kg de N absorbido, los únicos tratamientos que se diferenciaron entre sí fueron Avena y Mezcla,

siendo la Mezcla la que presentó mayor cantidad de N absorbido con respecto a la Avena.

Tabla 12

Porcentaje de N a espigazón según CS

Cultivo de servicio	% N a espigazón
Barbecho	1,55 ab
Av. Byzantina	1,32 b
Vicia villosa	1,73 a
Av. Byzantina + Vicia villosa	1,67 a

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$).

Para el porcentaje de N a espigazón, los tratamientos que presentaron diferencias significativas fueron Avena con Vicia y la Mezcla. El resto de los tratamientos no se diferenciaron entre sí.

4.4.2 COMPONENTES NUMÉRICOS DEL RENDIMIENTO

Tabla 13

Número de plantas/m², macollos/m² y espigas/m² de cebada según cultivo de servicio previo a soja

Cultivo de servicio	Plantas/m²	Macollos/m²	Espigas/m²
Barbecho	36	346	526
Av. Byzantina	45	401	482
Vicia villosa	45	461	555
Av. Byzantina + Vicia villosa	42	469	565

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$).

No se evidenciaron diferencias significativas para ninguna de las tres variables estudiadas.

Tabla 14

Rendimiento en grano de cebada y calidad física de grano cuantificada como tamaño

	Barbecho	Av. Byzantina	Vicia villosa	Av. Byzantina + Vicia villosa
2,8 mm	46 b	67 a	43 b	47 b
2,8 + 2,5 mm	89 b	93 a	87 b	86 b
2,5 mm	43 a	26 b	44 a	40 a
2,2 mm	9 a	5 b	10 a	10 a
Rendimiento (kg ha⁻¹)	3162 b	3643 ab	4263 ab	4448 a
Peso de 1000 granos	40 b	43 a	39 c	40 bc

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$).

Con respecto a la calidad de grano, se evidenciaron diferencias para la cebada de primera, siendo Avena el tratamiento que presentó mayor porcentaje de primera, no diferenciándose entre si el resto de los tratamientos. Siguiendo con la suma de los granos de cebada de primera más segunda, el comportamiento es similar al mencionado anteriormente. Para la cebada de segunda, Avena es el tratamiento que presentó menor

porcentaje de granos de segunda y el único tratamiento que se diferenció significativamente del resto. Por último, la cebada de tercera se comportó de la misma manera que la cebada de segunda.

Con relación al rendimiento, la única diferencia significativa que se puede observar es entre el Barbecho y la Mezcla, ya que el resto de los tratamientos no presentaron diferencias significativas.

Para la variable peso de mil granos se observan diferencias significativas. La Avena fue el cultivo de servicio que generó condiciones para que la cebada presentara mayor peso de mil granos. El Barbecho y la Mezcla no se diferenciaron y Vicia con la Mezcla tampoco, pero si se encontraron diferencias entre Vicia y el Barbecho.

5 DISCUSIÓN

5.1 EFECTO RESIDUAL DE LOS CULTIVOS DE SERVICIO SEMBRADOS PREVIO AL CULTIVO DE VERANO SOBRE EL CULTIVO INVERNAL SIGUIENTE

Los experimentos fueron analizados de manera independiente, ya que, si bien estaban ubicados de manera contigua, dentro del mismo potrero, la falta de aleatorización del “efecto antecesor de verano”, no permite realizar un análisis estadístico conjunto. No obstante, la discusión se realizará en paralelo, destacando las diferencias encontradas entre ambos experimentos, realizados bajo idénticas condiciones ambientales y manejo histórico del sitio.

Con relación a los efectos residuales en suelo, se destaca el comportamiento del Barbecho. Este tratamiento es un manejo testigo, pero en la práctica no resulta útil ya que el suelo debe quedar cubierto durante el invierno. Bajo esta premisa, se considera útil cuantificar el efecto residual diferencial de las distintas opciones invernales de CS. A partir de lo mencionado anteriormente, el resultado más relevante del trabajo es la cuantificación de la residualidad en el aporte de N de los cultivos de servicio sembrados en invierno sobre el segundo cultivo de renta de la secuencia. Esto implica que su efecto se mantuvo en el tiempo, por lo que su siembra puede considerarse un “costo del sistema” y no un costo del cultivo de verano siguiente.

El efecto benéfico de sembrar un CS leguminosa resultó cuantitativamente mayor cuando el cultivo de verano fue Maíz que cuando fue Soja. Este efecto se cuantificó como aporte de N-NO_3^- desde el suelo (Tabla 4 y 5) y como N absorbido por cebada 55 días post siembra (Tabla 6 y 11). Si bien la respuesta de cebada fue relativamente baja, lo que se explicaría por los valores altos de N-NO_3^- en suelo en todos los tratamientos, luego de Maíz la única variable que presentó efecto significativo de la fertilización de N fue el peso de mil granos (Tabla 10).

La siembra de Avena como CS previo a Maíz confirmó la menor disponibilidad de N para el cultivo. Esta limitante fue levantada sembrando la Mezcla con Vicia (Tabla 4 y 6). En tanto, luego de Soja, si bien los efectos residuales de los CS siguieron la misma tendencia, su impacto sobre cebada fueron menores.

Es necesario considerar que los resultados obtenidos fueron bajo condiciones de extrema sequía estival, por lo que no existió extracción de N por los cultivos estivales (Maíz y Soja) ni tampoco condiciones de precipitaciones que favorecieran pérdidas de nutrientes hasta abril del 2023. A partir de mayo, la concentración de N-NO_3^- fue disminuyendo desde presiembra hasta macollaje en todos los tratamientos y en las dos

profundidades, siendo más marcada la diferencia entre la siembra y macollaje (Tabla 4 y 5). Esta disminución en el contenido de N-NO_3^- entre la presiembra y la siembra puede atribuirse a lavado de N-NO_3^- provocado por las precipitaciones (154 mm). En cuanto a la diferencia de N-NO_3^- entre la siembra y macollaje parece estar relacionada al crecimiento y desarrollo del cultivo de Cebada, ya que es durante esta etapa cuando la producción de materia seca incrementa marcadamente y, por consiguiente, los requerimientos de N por parte del cultivo.

5.1.1 MAÍZ COMO CULTIVO ANTECESOR DE VERANO

Para la profundidad de 0-7,5 cm, el contenido de N-NO_3^- en presiembra y siembra se encuentra dentro del rango tomado como aceptable ($10 - 20 \text{ mg.kg}^{-1}$). En cambio, en macollaje, para todos los cultivos de servicio excepto para la Vicia, el contenido de N-NO_3^- fue menor a 10 mg.kg^{-1} , encontrándose este valor por debajo de lo aceptable.

Para la profundidad de 7,5-15 cm el contenido de N-NO_3^- en presiembra y siembra se encuentra dentro del rango tomado como aceptable ($10 - 20 \text{ mg.kg}^{-1}$), excepto para la Avena, que presentó valores menores a 10 mg.kg^{-1} .

En ambas profundidades, la Vicia fue uno de los tratamientos que se destacó por el alto contenido de N-NO_3^- residual en suelo. Tal y como fue mencionado en la revisión bibliográfica, los cultivos de Maíz que presentan como CS antecesor especies leguminosas presentan mayor contenido de N-NO_3^- (Restovich et al., 2012). En el caso de las gramíneas, se debe tener en cuenta la gran dependencia que tienen las mismas de la disponibilidad de N del sistema, por lo que eran esperables los resultados obtenidos teniendo como CS Avena. Con respecto a la Mezcla, su comportamiento fue similar al Barbecho en ambas profundidades. Si bien no presentó una concentración de N-NO_3^- tan elevada como Vicia, al estar presente una gramínea consumiendo el N fijado y, además, al tener alta relación C/N, inmoviliza el mismo. Por otro lado, la leguminosa en la Mezcla permitió aprovechar los beneficios de la fijación biológica y que la concentración de N-NO_3^- no disminuyera como lo hizo cuando el tratamiento era Avena puro.

5.1.2 SOJA COMO CULTIVO ANTECESOR DE VERANO

Al igual que en Maíz, se puede apreciar como el contenido de N-NO_3^- va disminuyendo desde presiembra hasta macollaje en todos los tratamientos y en las dos profundidades, siendo más marcada la diferencia entre siembra y macollaje. Para la profundidad de 0-7,5 cm, el contenido de N-NO_3^- en presiembra y siembra se encuentra dentro del rango tomado como aceptable ($10 - 20 \text{ mg.kg}^{-1}$), excepto para la Avena en presiembra. En

cambio, en macollaje, para todos los cultivos de servicio el contenido de N-NO_3^- es menor a 10 mg.kg^{-1} , encontrándose este valor por debajo de lo aceptable.

Para la profundidad de 7,5-15 cm el contenido de N-NO_3^- en presiembra y siembra se encuentra dentro del rango tomado como aceptable ($10 - 20 \text{ mg.kg}^{-1}$), excepto para la Avena, que presentó valores menores a 10 mg.kg^{-1} .

El Barbecho limpio fue uno de los tratamientos que presentó mayores valores N-NO_3^- en suelo, y, a diferencia de lo que ocurrió en Maíz, la concentración de N-NO_3^- varía según profundidad. Esto puede estar explicado por la baja relación C/N de la soja, la cual genera que el contenido de N-NO_3^- en suelo sea mayor porque hay menos inmovilización del mismo. Si bien se compara con leguminosas que fijan nitrógeno, se debe tener presente que, desde la cosecha del maíz hasta la siembra del próximo cultivo invernal, debido a la mineralización, el nitrógeno fue acumulándose en forma de nitrato en el suelo y dado que no hubo ningún cultivo creciendo, en la medida que se daba la descomposición del rastrojo del maíz, se incrementaba el nitrato en suelo. Por otro lado, la variación de N-NO_3^- dentro del perfil del suelo podría deberse a la lixiviación que ocurre luego de un período de precipitación. Esto se debe a que en el mes de mayo el total de precipitaciones fue de 121 mm y previo a la siembra (14 de Junio) el total de precipitaciones fue de 33 mm, sumando un total de 154 mm.

5.2 EFECTO RESIDUAL EN CEBADA SEGÚN CULTIVO DE SERVICIO PREVIO A MAÍZ Y SOJA COMO CULTIVOS ANTECESORES DE VERANO

5.2.1 BIOMASA Y ABSORCIÓN DE N A 55 DÍAS POST SIEMBRA

En las Tablas 6 y 11 se puede observar para Maíz y Soja respectivamente, que los únicos tratamientos que presentaron diferencias significativas para la producción de biomasa fueron la Avena y la Mezcla, siendo la cebada con antecesor Mezcla uno de los tratamientos que presentó la mayor producción de biomasa. Esto está en concordancia con lo mencionado en la revisión bibliográfica, los cultivos de servicio de especies gramíneas se caracterizan por una alta producción de MS y, a su vez, las especies leguminosas son capaces de fijar N. Todo esto provoca que sea esperable que la Mezcla sea uno de los tratamientos que mayor producción de biomasa presentara (Carr et al., 2020). Con respecto a los kg de N absorbido, el único tratamiento que se diferencio fue la Avena, siendo el cultivo antecesor que provocó que la cebada fuera la que menos kg de N absorbió. Esto podría estar explicado por no tener la posibilidad de fijar N, y también, por la alta inmovilización de N que se generó, ya que la relación C/N de sus residuos es alta (Carr et al., 2020).

5.2.2 PORCENTAJE DE N A ESPIGAZÓN DE CEBADA

Sobre ambos antecesores de verano, el % de N a espigazón de cebada fue modificado por el efecto CS. En el caso del antecesor soja, se cuantificó un efecto negativo de Avena 1,32% contra 1,6% para la media de otras alternativas. En tanto, sobre antecesor maíz, el % N mejoró con Vicia como CS; Mezcla y Barbecho tuvieron un comportamiento intermedio con Avena, lo cual es esperable ya que se trata de opciones con una especie leguminosa que se caracteriza por fijar N atmosférico. No hubo efecto fertilización con N ni interacción significativa ($p \leq 0,05$) con fertilización N, lo que sugiere que el efecto benéfico no fue solo atribuible al N. Estos resultados concuerdan con lo encontrado por Liu et al. (2024), en donde hallaron que fue una leguminosa la que presentó mayor contenido de N sobre la superficie del suelo por una mayor producción de biomasa. A su vez, la falta de efecto fertilización con N podría estar explicado por las condiciones climáticas bajo las cuales se llevó a cabo el trabajo, que se caracterizó por una extrema sequía estival, generando que haya suficiente concentración de N en suelo y por ende, el tratamiento sin agregado de fertilizante se comportó de la misma manera que el tratamiento fertilizado.

5.2.3 RENDIMIENTO: SUS COMPONENTES NUMÉRICOS

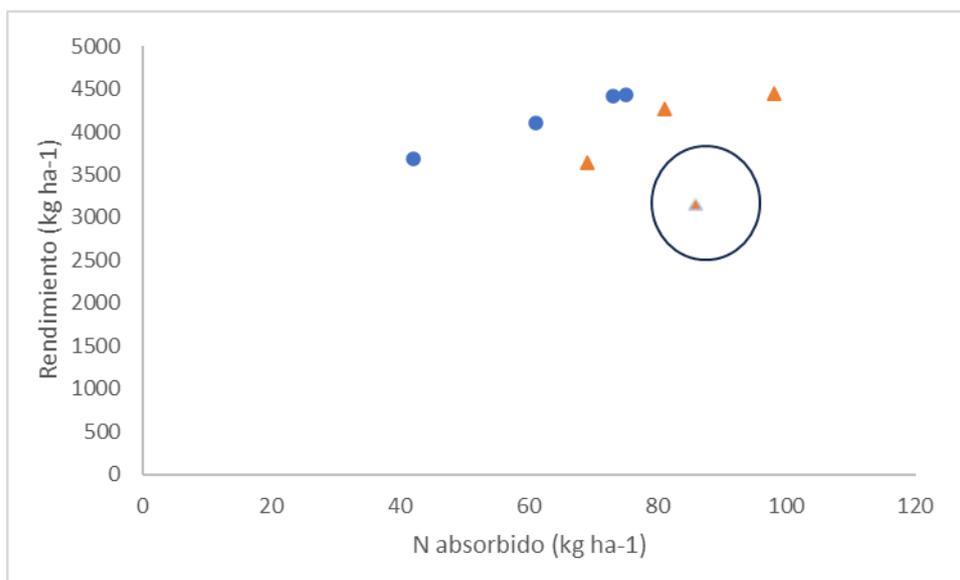
El rendimiento medio de cebada posterior a maíz fue 4163 kg ha^{-1} y siguiendo a soja, 3879 kg ha^{-1} . No es posible compararlos estadísticamente, pero en ambos casos el mayor rendimiento correspondió a la siembra luego de Mezcla y Vicia, promediando 4431 y 4355 kg ha^{-1} respectivamente. En ambos casos el menor rendimiento fue con Avena como CS (3663 kg ha^{-1} promedio).

El rendimiento en grano de cebada no fue afectado significativamente ($p \leq 0,05$) por los CS cuando se sembró luego de maíz. En tanto, siguiendo a soja, Barbecho produjo significativamente menos grano (Tabla 14). Las diferencias resultaron significativas únicamente entre el Barbecho y la Mezcla, siendo el rendimiento de cebada mayor cuando se incluyó una leguminosa a la Mezcla. Interpretamos el resultado como un efecto negativo de mantener el suelo en Barbecho, ya que los CS no difirieron entre sí. No obstante Mezcla resultó la mejor opción. Los resultados también sugieren que, siguiendo a soja, el servicio incrementado ecosistémico afectado fue adicional al suministro de N.

En la Figura 6 se presenta la relación entre N absorbido 55 días post siembra y rendimiento de cebada siguiendo a maíz y soja.

Figura 6

Relación entre N absorbido 55 días post siembra y rendimiento de cebada



Nota. N absorbido por cebada 55 días post siembra y rendimiento de grano siguiendo a maíz (círculos) y soja (triángulo). Triángulo dentro de círculo corresponde a Barbecho.

No se encontraron diferencias significativas en los componentes numéricos del rendimiento lo que, exceptuando Barbecho en soja, explica la falta de respuesta en rendimiento. La información relevada no permite identificar qué variable explica el comportamiento diferencial de la cebada sobre Barbecho teniendo como cultivo antecesor de verano soja (Figura 6). El suministro de N desde el suelo permitió absorber más de 80 kg ha⁻¹ de N 55 días post siembra, pero el rendimiento obtenido fue similar a los manejos que aportaron el 50% de esa cantidad. Una posible explicación podría estar en la falta de cobertura del suelo. La ausencia de un CS previo y la baja relación C/N de la soja sugiere que el suelo quedó sin cobertura, afectando tanto la pérdida de agua por evaporación como la captura de agua de las precipitaciones. Otro factor que podría estar explicando este resultado es la presencia de malezas en el Barbecho, ya que al no haber cobertura presente genera un ambiente predisponente para el crecimiento y desarrollo de las mismas, acentuando el posible efecto sobre la disponibilidad de agua en el suelo. El número de plantas de Cebada logradas fue muy bajo en todos los tratamientos. Tomando como referencia un valor de 184 plantas/m² como el óptimo para cebada (Miralles et al., 2014), todos los cultivos de servicio presentaron un valor muy por debajo del óptimo. Es posible que este resultado sea consecuencia de una mala implantación del cultivo de cebada. Aun así, no es posible inferir que haya sido esta una limitante para la producción, ya que se alcanzó un número de espigas/m² considerado aceptable para cebada (Hoffman et al., 2010).

En cuanto a los macollos/m², ninguno de los tratamientos se encuentra dentro del rango establecido como óptimo (800-1000) (Hoffman et al., 2023). Este resultado podría estar explicado por el momento en el que se realizó el conteo de los mismos, ya que aún no se había definido el número máximo de macollos. Por otro lado, los únicos tratamientos que presentaron diferencias significativas fueron la Avena y la Vicia, la cual podría estar explicada por el aporte de nitrógeno proveniente de la fijación biológica llevada a cabo por la Vicia. Esto es posible que haya sido beneficioso para la generación de macollos. Con respecto a las espigas/m², todos los tratamientos se encontraron dentro del rango óptimo para cebada.

Por otro lado, el motivo por el cual se realiza la clasificación de la cebada es debido a que en maltería se deben remojar y germinar siempre en forma separada los granos mayores de 2,5 mm, ya que se comportan de forma completamente distinta a la fracción 2,2 - 2,5 mm. La fracción mayor a 2,8 mm presenta igual comportamiento a la de 2,5 - 2,8 mm y es por esta razón que se maltean siempre juntas. En Uruguay es importante que la cebada que se produce presente un elevado porcentaje de granos que superen la zaranda 2,5 mm ya que esta es la fracción exportable como cebada cervecera o como malta. Con relación a lo mencionado anteriormente, al exportar el 90% de la producción es importante la utilización de variedades de cebada que presenten de 85 a 90% de primera calidad (superior a la zaranda 2,5 mm). Dicho esto, los resultados obtenidos muestran para todos los tratamientos, un porcentaje mayor a 85% para cebada de primera más segunda calidad (Arias, 1991). La Avena generó el mayor porcentaje de cebada de primera y cebada de primera más segunda, lo cual podría estar explicado ya que fue el tratamiento que obtuvo mayor peso de granos.

En relación al peso de mil granos, para cebada posterior a Maíz la Mezcla es el único tratamiento que presentó comportamiento diferencial según manejo de la fertilización nitrogenada. En este caso, el nitrógeno afectó el peso de granos, ya que el tratamiento fertilizado generó condiciones que ocasionaron un menor peso de grano, lo cual se evidencia mediante la interacción CSxN. Se puede observar como la fertilización fue diferente según el antecesor, cuando el CS antecesor fue una leguminosa o mezcla el efecto de la fertilización fue negativo y cuando el CS antecesor fue una gramínea o Barbecho el efecto fue positivo. Este resultado coincide con el experimento realizado por Bergkvist et al. (2011), en el cual encontraron que el efecto residual de los cultivos de servicio compuestos por Mezclas (gramínea + leguminosa) casi se igualó a los efectos de los cultivos de servicio compuestos exclusivamente por leguminosas cuando no se aplicó fertilizante (N), pero los efectos positivos que aportan las Mezclas se vieron disminuidos cuando la dosis de N incrementaba. Con las dosis más altas (120 – 180 kg

N), los tratamientos compuestos por trébol blanco y trébol rojo puro tendieron a presentar un mayor efecto en el rendimiento del trigo en comparación a las Mezclas.

Para cebada posterior a Soja, se observan diferencias significativas. La Avena fue el cultivo de servicio que generó condiciones para que la cebada presentara mayor peso de mil granos. El Barbecho y la Mezcla no se diferenciaron y la Vicia con la Mezcla tampoco, pero si se encontraron diferencias entre Vicia y el Barbecho.

Con relación a los cultivos de servicio, la cebada con antecesor Avena fue el tratamiento que presentó mayor peso de granos tanto para Maíz como para Soja, lo cual podría estar explicado por un menor número de granos. Los granos por espiga son en primer lugar afectados por la deficiencia de agua, y posteriormente por estrés nutricional entre otros (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria [INIA], 2005). Esto pudo deberse a las condiciones de sequía en las cuales se realizó el trabajo, especialmente durante el período crítico del cultivo. Otro factor que pudo haber afectado el peso de grano es la fertilización nitrogenada en Maíz. Según los resultados obtenidos, el N afectó el número de granos. El peso de mil granos se vio perjudicado en función de la fertilización posiblemente porque ésta promueve el aumento en el número de granos, afectando la relación fuente/fosa (Magliano et al., 2013).

6 CONCLUSIONES

Se comprobó que la inclusión de cultivos invernales como cobertura del suelo genera un efecto residual en el suministro de nitrógeno, el cual se extiende al menos hasta el segundo cultivo de la secuencia. La magnitud de dicho efecto podría estar influenciada por la nula productividad de los cultivos de soja y maíz establecidos como primer cultivo en la rotación.

La incorporación de cultivos de servicio como Vicia villosa y Mezclas (Avena + Vicia) tuvo un efecto residual positivo significativo en el contenido de nitrógeno disponible en el suelo, especialmente cuando el cultivo antecesor es maíz. Esto demuestra que los CS de leguminosas pueden mejorar la sostenibilidad de los sistemas de producción al reducir la dependencia de fertilizantes nitrogenados. Por otro lado, Avena mostró limitaciones en su capacidad de suministrar nitrógeno desde el suelo, lo cual puede restringir el rendimiento de los cultivos posteriores si no se corrige con fertilización adicional.

El efecto residual de los cultivos de servicio (CS) fue más relevante después del cultivo de maíz que de soja, lo que se atribuye a la mejor calidad de los residuos de soja, lo que reduce la necesidad de aporte adicional de N en los sistemas de producción.

No se observaron diferencias significativas en el rendimiento de grano de cebada entre los distintos CS, pero sí en cuanto a la calidad física de granos, siendo la Avena quien logró los granos de mayor tamaño y calidad.

La implementación de los sistemas de mezclas de gramíneas y leguminosas ofrece un balance entre la producción de biomasa y la fijación de nitrógeno. Esta puede ser una alternativa viable para minimizar la pérdida de nutrientes y mejorar la sostenibilidad del sistema de producción.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, R., Steinbach, H. S., & De Paepe, J. L. (2017). ¿Son convenientes los cultivos de cobertura en la región pampeana? Un análisis de la información existente. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, (26), 17-19.
- Ambrosini, V. G., De Almeida, J. L., De Araujo, E. A., Alves, L. A., Filippi, D., Flores, J. P. M., Fostim, M. L., Fontoura, S. M. V., Bortoluzzi, E. C., Bayer, C., & Tiecher, T. (2022). Effect of diversified cropping systems on crop yield, legacy, and budget of potassium in a subtropical Oxisol. *Field Crops Research*, 275, Artículo e108342. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108342>
- Arias, G. (1991). *Calidad Industrial de la cebada cervecera*. INIA. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2919/1/111219220807120028.pdf>
- Bentancor Salvo, F., & Ferreira Larrosa, J. (2024). *Aporte de nitrógeno al maíz por parte de distintos cultivos de servicio invernales tales como gramíneas puras, leguminosas y sus mezclas* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Bergkvist, G., Stenberg, M., Wetterlind, J., Båth, B., & Elfstrand, S. (2011). Clover cover crops under-sown in winter wheat increase yield of subsequent spring barley: Effect of N dose and companion grass. *Field Crops Research*, 120(2), 292-298. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.11.001>
- Carr, P. M., Cavigelli, M. A., Darby, H., Delate, K., Eberly, J. O., Fryer, H. K., Gramig, G. G., Heckman, J. R., Mallory, E. B., Reeve, J. R., Silva, E. M., Suchoff, D. H., & Woodley, A. L. (2020). Green and animal manure use in organic field crop systems. *Agronomy Journal*, 112(2), 648-674. <https://doi.org/10.1002/agj2.20082>
- Ernst, O., Alzueta, M. E., Ernst, F., Romero Rüsck, F. A., Barriola, I. M., Bagnato, C. E., Álvarez, S., & Piñeiro, G. (2022). Cuantificación de los cambios recientes en el uso del suelo en el litoral oeste uruguayo. *Cangüé*, (44), 22-28. [https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/43649/1/Cangué%20-%20Cambios%20uso%20del%20suelo.pdf](https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/43649/1/Cangu%C3%A9%20-%20Cambios%20uso%20del%20suelo.pdf)
- Farm Progress. (s.f.). *Cover crops: Best management practices*. <https://s3.wp.wsu.edu/uploads/sites/2053/2015/09/covercrops-bestmanagementpractices.pdf>

- Hoffman, E., Fassana, N., Akerman, A., & Van den Dorpel, M. (2023). *Caracterización de cebada 2022*. Universidad de la República. https://portal.fagro.edu.uy/wp-content/uploads/2024/10/Informe_Caracterizacion_Cebada_2022_-_FAgro-EEMAC_2023.pdf
- Hoffman, E., Perdomo, C., Ernst, O., Bordoli, M., Pastorini, M., Pons, C., & Borghi, E. (2010). Propuestas para el manejo del nitrógeno en cultivos de invierno en Uruguay. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, (46), 13-17.
- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.). (2005). *Jornada técnica cultivos de invierno*.
<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/6745/1/INIA.2005.SAD.n.404.pdf>
- Ley n° 15239: *Declaración de interés nacional: Uso y conservación de los suelos y de las aguas superficiales destinados a fines agropecuarios*. (1982). IMPO.
<https://www.impo.com.uy/bases/decretos-ley/15239-1981>
- Liu, K., Bandara, M., Hamel, C., Knight, J. D., & Gan, Y. (2020). Intensifying crop rotations with pulse crops enhances system productivity and soil organic carbon in semi-arid environments. *Field Crops Research*, 248, Artículo e107657.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107657>
- Liu, L., Knight, J. D., Lemke, R. L., & Farrell, R. E. (2024). Quantifying the contribution of above- and below-ground residues of chickpea, faba bean, lentil, field pea and wheat to the nitrogen nutrition of a subsequent wheat crop. *Field Crops Research*, 313, Artículo e109412. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109412>
- Lupwayi, N. Z., & Soon, Y. K. (2016). Nitrogen-related rotational effects of legume crops on three consecutive subsequent crops. *Soil Science Society of America Journal*, 80(2), 306-316. <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.08.0299>
- Magliano, A. P., Prystupa, P., & Gutierrez Boem, F. (2013). La fertilización nitrogenada afecta tamaño y contenido de proteína en granos de cebada cervecera. *Fertilizar*, (27), 27-29. <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2020/09/27.pdf>
- Miguez, F. E., & Bollero, G. A. (2005). Review of corn yield response under winter cover cropping systems using meta-analytic methods. *Crop Science*, 45(6), 2318-2329. <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.0014>
- Miralles, D. J., González, F. G., Abeledo, L. G., Serrago, R. A., Alzueta, I., García, G. A., De San Caledonio, R. P., & Lo Valvo, P. (Eds.). (2014). *Manual de trigo y cebada para el Cono Sur: Procesos fisiológicos y bases de manejo*. CYTED.

- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2023). *Resultados de la encuesta agrícola "Invierno 2023"*. MGAP. https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/noticias/comunicado_prensa_inv_2023.pdf
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2024). *NSP – Biodiversidad y servicios ecosistémicos*. <https://www.fao.org/agriculture/crops/plan-thematique-du-site/theme/biodiversity/es/>
- Pereyra Grecco, M., & Morán Vallejo, E. (2024). *Producción de raíces, biomasa aérea y aportes de nitrógeno de los distintos cultivos de servicio* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Restovich, S. B., Andriulo, A. E., & Portela, S. I. (2012). Introduction of cover crops in a maize–soybean rotation of the Humid Pampas: Effect on nitrogen and water dynamics. *Field Crops Research*, 128, 62-70. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.12.012>
- Rimski-Korsakov, H., Álvarez, C. R., & Lavado, R. S. (2015). Cover crops in the agricultural systems of the Argentine Pampas. *Journal of Soil and Water Conservation*, 70(6), 134A-140A. <https://doi.org/doi:10.2489/jswc.70.6.134A>
- Rivière, C., Béthinger, A., & Bergez, J. E. (2022). The effects of cover crops on multiple environmental sustainability indicators: A review. *Agronomy*, 12(9), Artículo e2011. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092011>
- Ruffo, M., & Parsons, A. (2004). Cultivos de coberturas en sistemas agrícolas. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, (21), 8-17. <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2004/03/Cultivo-Cobertura-Matias-Ruffo.pdf>
- Tonitto, C., David, M. B., & Drinkwater, L. E. (2006). Replacing bare fallows with cover crops in fertilizer-intensive cropping systems: A meta-analysis of crop yield and N dynamics. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 112(1), 58-72. <https://doi.org/doi:10.1016/j.agee.2005.07.003>

8 ANEXO

Figura 1

Relación altura – peso de Cebada

