

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**DINÁMICA DEL NITRÓGENO EN MAÍZ POSTERIOR A CULTIVOS DE
SERVICIO INVERNALES**

por

**María Ángela CERRUTTI RODRÍGUEZ
Manuel LÓPEZ MARTINELLI**

**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**”.



PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Director/a:

Ing. Agr (PhD) Guillermo Siri-Prieto

Tribunal:

Ing. Agr (PhD) Guillermo Siri-Prieto

Ing. Agr (MSc) Santiago Álvarez Durán

Ing. Agr (PhD) Agustín Núñez Russi

Fecha:

06 de mayo de 2025

Estudiante:

María Ángela Cerrutti Rodríguez

Manuel López Martinelli

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a familiares y amigos, quienes nos brindaron su apoyo incondicional, comprensión y motivación en esta etapa tan significativa para nosotros.

Agradecemos a la institución, docentes, especialmente nuestro tutor Santiago Álvarez y funcionarios por transmitirnos su conocimiento y sabiduría.

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN	3
AGRADECIMIENTOS	4
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	7
RESUMEN	8
SUMMARY	9
1 INTRODUCCIÓN	10
2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1 IMPORTANCIA DE LOS CULTIVOS DE SERVICIO EN LA AGRICULTURA	11
2.2 SERVICIOS ECOSISTEMICOS: RECICLAJE Y APORTE DE NITROGENO	12
2.3 APORTE DE NITRÓGENO: FIJACIÓN BIOLÓGICA DE NITRÓGENO.	13
2.4 RECICLAJE DE NITRÓGENO: ABSORCIÓN DEL SUELO Y RELACIÓN C/N	14
2.5 IMPACTO DE LOS CULTIVOS DE SERVICIO EN EL MANEJO DEL NITRÓGENO	14
3 ESPECIES DE CULTIVOS DE SERVICIO.....	16
3.1 VICIA VILLOSA	16
3.2 AVENA STRIGOSA.....	17
3.3 AVENA BYZANTINA	17
4 MATERIALES Y METODOS.....	19
4.1 LOCALIZACION DE LOS SITIOS	19
4.2 CARACTERIZACIÓN DEL AMBIENTE DE PRODUCCION.....	19
4.3 DISEÑO EXPERIMENTAL	19
4.4 MANEJO DE LOS SITIOS	20
4.5 EVALUACIONES	21
4.5.1 Muestreo de biomasa y análisis de nitrógeno en planta	21
4.5.2 Muestreo de suelo	22
5 MODELO ESTADISTICO	23
6 CARACTERIZACION CLIMATICA	24
6.1 PRECIPITACIONES.....	24
7 RESULTADOS Y DISCUSION	27

7.1	EFFECTO DEL TRATAMIENTO, AÑO Y LOCALIDAD EN LAS VARIABLES EVALUADAS	27
7.2	CORRELACIONES ENTRE VARIABLES ANALIZADAS	30
7.3	PRODUCCION Y APORTE DE N DE LOS CS	31
7.4	EFFECTO DE LOS CS EN EL NIVEL DE N-NO ₃ - EN SUELO.....	34
8	CONCLUSION	40
9	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	42

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla No.

Tabla 1 Información de manejo de tratamientos.....	20
Tabla 2 Siembra y aplicaciones de herbicidas en CS, barbecho y cultivo de maíz	21
Tabla 3 Interacciones y efecto año y localidad entre los tratamientos y las variables evaluadas	28
Tabla 4 Correlación de variables estudiadas.....	30
Tabla 5 Resultados de biomasa seca, N en biomasa seca y relación C/N de los CS....	32
Tabla 6 Niveles de N-NO ₃ ⁻ en distintas etapas del cultivo de maíz según CS antecesor y año	35

Figura No.

Figura 1 Ejemplo en red de araña de servicios ecosistémicos aportados por diferentes CS.....	11
Figura 2 Ciclo del nitrógeno.....	13
Figura 3 Esquema del diseño experimental.....	20
Figura 4 Precipitaciones mensuales durante temporada 2022-2024 en INIA y EEMAC en comparación con datos históricos (1991-2020)	25
Figura 5 Temperaturas mensuales durante temporada 2022-2024 en INIA y EEMAC en comparación con datos históricos (1991-2020).....	26
Figura 6 N-NO ₃ ⁻ en distintas etapas del ciclo de maíz en función del porcentaje de leguminosas	37

RESUMEN

En las últimas décadas, la intensificación agrícola en Uruguay ha generado efectos negativos sobre el suelo y el ambiente, como la erosión, la pérdida de biodiversidad y la contaminación por agroquímicos. Ante este escenario, los cultivos de servicio (CS) emergen como una herramienta clave para una agricultura más sostenible, gracias a su capacidad para mejorar la salud del suelo y aportar servicios ecosistémicos. Las hipótesis de esta tesis fueron: 1) que CS mezcla de gramíneas con leguminosas logran mantener una alta productividad y buena calidad del residuo en distintos ambientes; y 2) que los CS que incluyen leguminosas inciden diferencialmente en la dinámica de nitrógeno (N) en suelo en comparación a barbechos largos o CS que no incluyen leguminosas, pudiendo ser medido a partir de variaciones en los niveles de nitrato (N-NO_3^-) en suelo. El objetivo general fue estudiar el efecto de diferentes CS invernales en la dinámica del N. Los objetivos específicos fueron: 1) evaluar la producción de biomasa, el aporte de N y la relación C/N de distintos CS y 2) cuantificar la disponibilidad de N-NO_3^- según el antecesor de invierno en distintos momentos del ciclo del cultivo de maíz. Durante dos años se estableció una red de cuatro experimentos en dos localidades, cada uno con un diseño en bloques completamente al azar con anidamiento. Cada experimento contó con cinco tratamientos: *Avena byzantina* (gramínea pura), Barbecho químico (testigo), *Vicia villosa* (leguminosa pura), *Avena strigosa*+*Vicia villosa* (mezcla) y *Avena byzantina*+*Vicia villosa* (mezcla). Se evaluó la producción de biomasa, contenido de N y liberación N-NO_3^- . Los resultados indican que los CS que incorporaron *Vicia villosa*, capturaron más N y presentaron menor relación C/N, promoviendo una liberación más rápida y sostenida de N en suelo. En comparación con CS de *Vicia villosa* pura, las mezclas produjeron más biomasa pero con menor C/N. El porcentaje de *Vicia villosa* en la biomasa en la mezcla fue una variable determinante del nivel de N-NO_3^- en suelo durante todo el ciclo de maíz. Las gramíneas generaron más biomasa, pero con una relación C/N más alta, lo que provocó inmovilización de N en suelo y los menores niveles de N-NO_3^- en suelo. Es a destacar que considerar la variabilidad agroclimática e historia de chacra junto con un manejo adecuado de los CS tiene gran relevancia al momento de optimizar la eficiencia en el uso del N y contribuir a la sostenibilidad del sistema agrícola.

Palabras clave: cultivos de servicio, nitrógeno, biomasa, leguminosas, gramíneas, maíz

SUMMARY

In recent decades, agricultural intensification in Uruguay has generated negative effects on the soil and environment, such as erosion, loss of biodiversity, and contamination from agrochemicals. In this context, cover crops (CC) have emerged as a key tool for more sustainable agriculture, thanks to their ability to improve soil health and provide ecosystem services. The hypotheses of this thesis were: (1) that CCs consisting of grass-legume mixtures maintain high productivity and good residue quality in different environments; and (2) that CCs including legumes improve nitrogen (N) dynamics in the soil compared to long fallows or CCs without legumes, which can be measured through variations in soil nitrate (N-NO₃⁻) levels. The general objective was to study the effect of different winter CCs on N dynamics. The specific objectives were: (1) to evaluate biomass production, N contribution, and the C/N ratio of different CCs; and (2) to quantify N-NO₃⁻ availability according to the winter predecessor at different stages of the maize crop cycle. Over two years, a network of four experiments was established in two locations, each with a randomized complete block design with nesting. Each experiment included five treatments: *Avena byzantina* (pure grass), chemical fallow (control), *Vicia villosa* (pure legume), *Avena strigosa* + *Vicia villosa* (mixture), and *Avena byzantina* + *Vicia villosa* (mixture). Biomass production, N content, and N-NO₃⁻ release were evaluated. The results indicate that CCs incorporating *Vicia villosa* captured more N and had a lower C/N ratio, promoting a faster and more sustained release of N into the soil. Compared to pure *Vicia villosa* CCs, mixtures produced more biomass but with a higher C/N ratio. The percentage of *Vicia villosa* in the biomass of the mixture was a determining factor in soil N-NO₃⁻ levels throughout the maize cycle. Grasses generated more biomass but had a higher C/N ratio, leading to N immobilization in the soil and lower soil N-NO₃⁻ levels. It is important to highlight that considering agroclimatic variability and field history, along with proper CC management, is crucial for optimizing N use efficiency and contributing to the sustainability of the agricultural system.

Keywords: cover crops, nitrogen, biomass, legumes, grasses, maize

1 INTRODUCCIÓN

La agricultura ha experimentado cambios constantes en las últimas dos décadas, destacándose la implementación de la siembra directa junto a un paquete tecnológico que tuvo como resultado la intensificación agrícola. A consecuencia de ello se generó un incremento del área bajo agricultura continua, en detrimento de área de pasturas. Este suceso de “agriculturización”, impulsada por el predominio del cultivo de soja, generó un proceso de degradación de suelos y pérdida de biodiversidad ecosistémica, entre otros impactos negativos como la eutrofización y contaminación de los cursos de agua debido a un uso intensivo de agroquímicos.

Por esta razón, se promulgó en Uruguay la Decreto Ley nº 15.239: *Uso y conservación de los suelos y de las aguas superficiales destinados a fines agropecuarios* (1982). Su objetivo fue reducir el riesgo de erosión del suelo. Ello implicó planificar e implementar buenas prácticas agrícolas que limitaran la erosión del suelo por debajo de un nivel de tolerancia. En la práctica se tradujo en un incremento del área con cultivos en crecimiento, pero sobre todo en la introducción de los CS en las rotaciones de cultivo. En este contexto, los CS emergen como una herramienta clave para una agricultura sostenible, al proporcionar servicios ecosistémicos esenciales para mantener o mejorar los sistemas de producción, como el control de insectos plaga, malezas y enfermedades, así como una mejora en la salud del suelo mediante el aporte de nutrientes y materia orgánica. Sin embargo, distintas especies pueden proveer de diferentes servicios ecosistémicos al sistema de producción por lo que resulta esencial cuantificar el aporte que éstas pueden realizar.

En este estudio se plantea como hipótesis: 1) que CS mezcla de gramíneas con leguminosas logran mantener una alta productividad y buena calidad del residuo en distintos ambientes; y 2) que los CS que incluyen leguminosas inciden diferencialmente en la dinámica de N en suelo en comparación a barbechos largos o CS que no incluyen leguminosas, pudiendo ser medido a partir de variaciones en los niveles de N-NO_3^- en suelo. El objetivo general fue estudiar el efecto de diferentes CS invernales en la dinámica del N. Los objetivos específicos son: 1) evaluar la producción de biomasa, el aporte de N y la relación C/N de distintos CS y 2) cuantificar la disponibilidad de N-NO_3^- según el antecesor de invierno en distintos momentos del ciclo del cultivo de maíz.

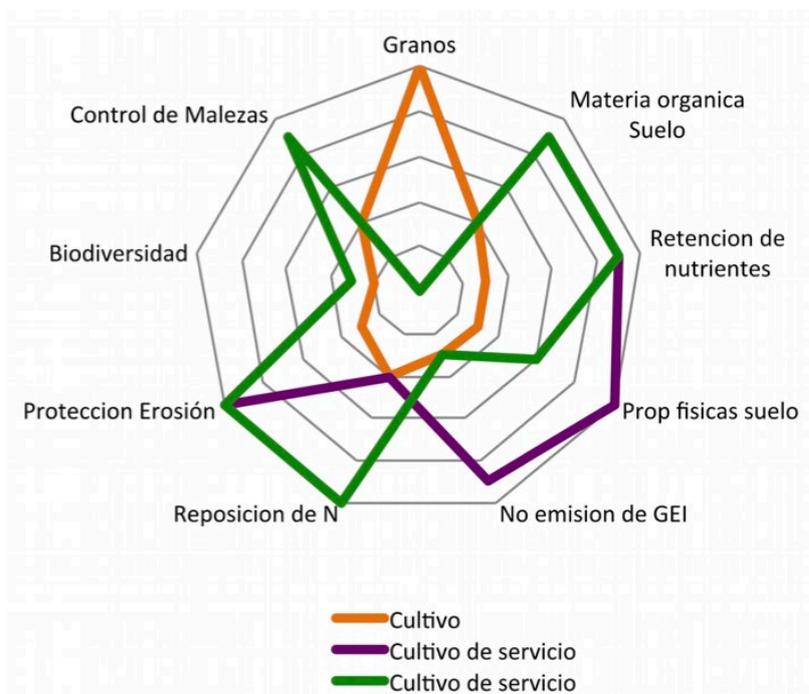
2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 IMPORTANCIA DE LOS CULTIVOS DE SERVICIO EN LA AGRICULTURA

Los CS son una herramienta clave para una producción agrícola más equilibrada y para la restauración de recursos naturales degradados por prácticas inadecuadas. No tienen como objetivo principal la rentabilidad económica y se implementan temporalmente entre dos cultivos de renta. Su importancia radica fundamentalmente en la posibilidad de aportar diferentes servicios ecosistémicos, según la o las especies elegidas (*Figura 1*).

Figura 1

Ejemplo en red de araña de servicios ecosistémicos aportados por diferentes CS



Nota. Tomada de Piñeiro (2018).

Los CS inciden directamente en factores limitantes de la producción agrícola como la disponibilidad de nutrientes y el agua del suelo (Teasdale, 1996). Ejercen un rol importante en la mejora de la estructura y fertilidad del suelo, mediante el control de la erosión, el aumento del contenido de materia orgánica, la disponibilidad de nutriente y en la tasa de infiltración de agua (Álvarez et al., 2012). Además, la biomasa producida les permite acumular nutrientes esenciales como N y fósforo y reducir sus pérdidas (Clark, 2007). Su capacidad de competencia e interferencia les otorga un papel crucial en el control de la población de malezas durante su ciclo de vida y en los cultivos de renta

posteriores, aun así, es necesario complementarlos con herbicidas u otras tácticas para optimizar dicho control y el rendimiento de los cultivos (Teasdale, 1996). Los CS generan condiciones favorables para los polinizadores y enemigos naturales, lo que podría facilitar una transición hacia una menor dependencia de fitosanitarios de síntesis química (Bianchi et al., 2006). La diversidad de servicios ecosistémicos que los CS pueden ofrecer depende en gran medida de las especies seleccionadas. Por lo tanto, la planificación adecuada de estos cultivos, considerando las necesidades específicas del agroecosistema y los objetivos del productor, es fundamental para maximizar los beneficios.

En el siguiente capítulo se profundiza sobre el servicio ecosistémico reciclaje y aporte de N y como puede ser afectado. Este es el centro de este trabajo de investigación.

2.2 SERVICIOS ECOSISTEMICOS: RECICLAJE Y APORTE DE NITROGENO

El N es un nutriente esencial para la productividad de los sistemas agrícolas, siendo la principal limitante luego del agua, para el crecimiento de las plantas (Vitousek et al., 1997). Existen diversos procesos de ganancia y pérdida que afectan su disponibilidad (Figura 2). En el suelo, el N ingresa a través de procesos como la fijación biológica de nitrógeno (FBN), el aporte de residuos orgánicos y fertilizantes y egresa del sistema a partir de procesos como la lixiviación, desnitrificación, volatilización y erosión.

El N en el suelo puede estar presente en formas orgánicas o inorgánicas. Que se favorezca una u otra forma depende de una compleja interacción de microorganismos sensibles a factores como la calidad de los residuos incorporados, la humedad, temperatura, textura del suelo y contenido de materia orgánica, que determinan la mineralización (pasaje a forma inorgánica) o inmovilización (pasaje a forma orgánica) del N (Philippot & Germon, 2005). Las plantas solo pueden acceder a sus formas inorgánicas: amonio y N-NO_3^- (Vitousek & Matson, 1985).

El aporte de N por este medio es de gran relevancia en sistemas de agricultura continua con una alta frecuencia de cultivos de renta y por ende de altos niveles de extracción de N. CS que incluyen leguminosas podrían restituir parcialmente el N extraído por dichos cultivos. Además, se destaca que esta familia de especies aporta N en residuos con una muy baja relación C/N, favoreciendo los ciclos de crecimiento de los microorganismos que constituyen la materia orgánica, mediante una liberación paulatina de N (Álvarez et al., 2012; Baigorria et al., 2011; Finney et al., 2016). De esta manera se podría reducir el fertilizante requerido por el cultivo de renta y aumentar el N en forma orgánica (Crozier et al., 1994).

2.4 RECICLAJE DE NITRÓGENO: ABSORCIÓN DEL SUELO Y RELACIÓN C/N

Además de su rol en el aporte de N, los CS son una opción agronómica útil para el manejo de N del sistema, al capturar N inorgánico del suelo susceptible a la lixiviación durante el período de crecimiento de los cultivos invernales (Wagger et al., 1998). Una vez descompuesto los residuos, los mismos se reciclan quedando disponible para futuros cultivos de renta (Malpassi et al., 2000; Sainju & Singh, 2001; Stute & Posner, 1995).

Las gramíneas, al producir grandes cantidades de biomasa con alta C/N, liberan N lentamente y pueden provocar inmovilización temporal. Por el contrario, las leguminosas generan residuos con menor C/N, lo que acelera la mineralización y aumenta la disponibilidad de N en el corto plazo (Finney et al., 2017). Sin embargo, si no hay un cultivo que aproveche estos nutrientes, el N liberado puede quedar en solución, incrementando el riesgo de lixiviación, especialmente en sistemas con predominio de leguminosas.

2.5 IMPACTO DE LOS CULTIVOS DE SERVICIO EN EL MANEJO DEL NITRÓGENO

Los CS representan una estrategia fundamental para mejorar la sostenibilidad agrícola, al optimizar la dinámica de N en el suelo. Su impacto depende de la elección de especies, lo que influye en la disponibilidad y eficiencia de uso de N para los cultivos comerciales posteriores, además de aportar en la reducción de pérdidas por lixiviación y volatilización (Carciochi et al., 2023; Finney et al., 2016; Liu et al., 2020; Ross et al., 2015).

Las gramíneas destacan en la retención de N en su biomasa, limitando su lixiviación gracias a su alta relación C/N y lenta descomposición (Andrews et al., 2018;

Finney et al., 2016). Este efecto es particularmente relevante en regiones con precipitaciones irregulares, donde el almacenamiento prolongado del N en los residuos vegetales contribuye a la fertilidad del suelo (Carciochi et al., 2023; Liu et al., 2020).

Por otro lado, las leguminosas liberan N de manera más inmediata debido a su menor relación C/N y la presencia de compuestos fácilmente descomponibles. Estudios han demostrado que *Vicia villosa* puede aportar entre 27 y 175 kg N ha⁻¹ a partir del N presente en su biomasa aérea (Clark et al., 1994; Sainju et al., 2007). Si bien las leguminosas pueden favorecer la nutrición de cultivos sucesores, también aumenta el riesgo de lixiviación si las condiciones climáticas no permiten su pronta absorción (Ross et al., 2015). En este sentido, el uso de CS mezcla de leguminosas y gramíneas, al combinar las características de ambos materiales, podría equilibrar la liberación de N, asegurando su disponibilidad a lo largo del ciclo de cultivo y evitando deficiencias o excesos temporales.

La integración de CS de leguminosas en sistemas agrícolas permite reducir la dependencia de fertilizantes sintéticos, disminuyendo los costos de producción y los impactos ambientales asociados a su uso excesivo (Andrews et al., 2018; Finney et al., 2016; Liu et al., 2020). Investigaciones han reportado que en rotaciones con estos cultivos, los requerimientos de fertilización nitrogenada pueden disminuir significativamente. En sistemas donde se incorporan leguminosas como CS, se ha observado una reducción del uso de fertilizantes de hasta un 30 %, sin afectar el rendimiento de los cultivos comerciales (Carciochi et al., 2023; Cordeiro et al., 2022).

La incorporación de leguminosas y su rotación con gramíneas contribuye a mejorar la calidad del suelo, al incrementar el contenido de materia orgánica y la estabilidad estructural del suelo, favoreciendo la retención de agua y la disponibilidad de N a largo plazo (Liu et al., 2020; Ross et al., 2015).

3 ESPECIES DE CULTIVOS DE SERVICIO

Entre las familias de especies utilizadas a nivel nacional, se destacan las gramíneas, las leguminosas y combinaciones de estas. Cada familia de especie puede proveer, por sus propias características, de diferentes servicios ecosistémicos a los sistemas agrícolas. Específicamente servicios ecosistémicos como el control de la erosión y de malezas, o el aporte de carbono son característicos de las gramíneas, debido a su rápido desarrollo inicial, alta capacidad de producción de biomasa aérea y radicular y alta relación C/N de su rastrojo. Por otra parte, las leguminosas pueden contribuir significativamente a cubrir parte del requerimiento de N de los cultivos estivales, al poder incorporar N₂ proveniente de la FBN. Diaz Rossello (1992) estimó que por cada tonelada de materia seca (MS) de leguminosas producida, existiría una entrada de entre 30-40 kg de N ha⁻¹.

Las mezclas de especies permiten aprovechar la complementariedad funcional entre gramíneas y leguminosas, equilibrando la producción de biomasa, la relación C/N y la disponibilidad de N en el suelo. Un diseño adecuado de CS debe considerar ciclos de crecimiento, interacciones y competencias entre especies para maximizar sus beneficios (Carini, 2024). En este trabajo final de grado se trabajó con las especies que se describen a continuación.

3.1 VICIA VILLOSA

Vicia villosa es una leguminosa anual o bianual, si se le permite la resiembra natural, ideal como CS. Presenta un tipo de crecimiento rápido durante su período invernal-primaveral, con floración en primavera. Es una especie reconocida por su fácil establecimiento bajo condiciones óptimas de siembra, requiriendo buena disponibilidad hídrica y correcta inoculación. Tiene la capacidad de desarrollarse en suelos ácidos con presencia de aluminio. Requiere suelos de mediana fertilidad y bien drenados para una producción aceptable (Gilsanz, 2008).

Su capacidad de adaptación y sus características como CS la convierten en una herramienta valiosa dentro de las rotaciones agrícolas. Su inclusión no solo mejora la estructura del suelo, sino que también incrementa la biomasa microbiana y la actividad biológica del suelo, promoviendo una mayor disponibilidad de nutrientes esenciales (Carámbula, 2002) En cuanto a su manejo, la densidad de siembra óptima en un CS puro varía entre 15-25 kg ha⁻¹. El rango de densidad de plantas recomendado para lograr

niveles adecuados de cobertura en el momento de la supresión del cultivo es 30 – 40 pl. m⁻² (Baigorria et al., 2011; Renzi & Cantamutto, 2007). La siembra debe realizarse entre fines de febrero y mediados de invierno, siendo ideal en los meses de otoño, ya que este factor impacta significativamente en el potencial productivo (Baigorria et al., 2011).

En términos de productividad y aportes específicos, *Vicia villosa* presenta una producción de MS que varía entre 500 y 7200 kg ha⁻¹, dependiendo de las condiciones de manejo y ambientales (Vanzolini et al., 2009, como se cita en Farías, 2020). Además, tiene una alta capacidad de FBN, lo que mejora la estructura del suelo a largo plazo y genera mayores rendimientos en cultivos posteriores como el maíz (Carini, 2024).

3.2 AVENA STRIGOSA

Avena strigosa, comúnmente conocida como avena negra, es una gramínea anual invernal caracterizada por un buen vigor inicial debido a su ciclo de crecimiento más corto que otras especies (Kaspary et al., 2020). Se acopla a una amplia gama de suelos, desde arcillosos no muy húmedos hasta arenosos, mostrando buena adaptación a condiciones de baja fertilidad y pH más bajos en comparación con otros tipos de avenas, a su vez, responde positivamente al agregado de fertilizantes nitrogenados y fosforados (Carámbula et al., 1996).

En términos de manejo, la época de siembra recomendada para la avena negra abarca desde otoño hasta fines de invierno, con una densidad de siembra que varía entre 30 y 40 kg ha⁻¹. Permite la aplicación de herbicidas selectivos para el control de malezas de hoja ancha, lo que refuerza su capacidad competitiva ante las malezas (Kaspary et al., 2020).

La avena negra tiene una producción de forraje anual aproximada de entre 2700-10.000 kg MS ha⁻¹ (Carámbula et al., 1996; Gilsanz, 2008). Estas características hacen que sea ampliamente utilizada en Uruguay como un CS efectivo y competitivo.

3.3 AVENA BYZANTINA

Según mencionan Mesa y Elola (1996, como se cita en Camelo Banchemo & Leiva Sanchez, 2022) la avena amarilla es una especie de gramínea anual caracterizada por un ciclo intermedio a largo, con porte semipostrado a semierecto, hojas medianamente angostas de color verde claro y tallos finos. Las principales variedades utilizadas son la avena 1095a, siendo la más difundida en Uruguay, y la avena RLE 115.

Según mencionan Mesa y Elola (1996, como se cita en Camelo Banchemo & Leiva Sanchez, 2022) se adapta bien a suelos de textura media y pesada, siempre y cuando sean bien drenados. Esta especie presenta buen vigor inicial y una capacidad de implantación adecuada en un amplio rango de fechas de siembra, lo que la hace versátil para diferentes condiciones agroecológicas. Dichos autores aluden a una densidad promedio entre 50-60 kg ha⁻¹, aunque en siembras tempranas se recomienda aumentar la densidad para optimizar la implantación. Asimismo, comentan que dicho cultivo se adapta bien a métodos de siembra directa o convencional, siendo flexible en su manejo y en las fechas de establecimiento. Su capacidad de rebrote y macollaje le permite mantener una cobertura eficiente y una productividad constante, lo que refuerza su utilidad como cultivo de servicio o forrajero en rotaciones agrícolas (García et al., 1991).

La producción de biomasa puede alcanzar 7.900-10.300 kg MS ha⁻¹ aproximadamente dependiendo del cultivar (Gilsanz, 2008).

4 MATERIALES Y METODOS

4.1 LOCALIZACION DE LOS SITIOS

La etapa experimental a campo de este estudio se llevó a cabo en: i) la Estación Experimental “Dr. Mario A. Cassinoni” (EEMAC), perteneciente a la Facultad de Agronomía (Udelar), en el departamento de Paysandú, sobre la ruta Nro. 3; ii) INIA La Estanzuela. Estación Experimental “Dr. Alberto Boerger”. Ubicada en el departamento de Colonia, ruta 50, kilómetro 14. Repitiéndose los experimentos durante dos años: 2022 y 2023.

4.2 CARACTERIZACIÓN DEL AMBIENTE DE PRODUCCION

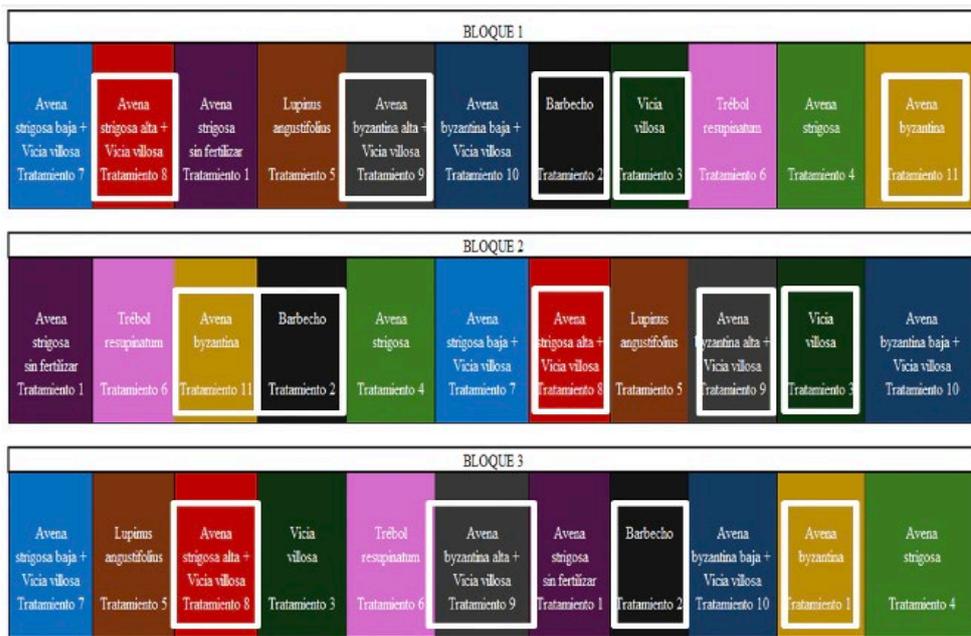
En EEMAC, el suelo donde se realizó el experimento pertenece a la unidad San Manuel de la carta de reconocimiento de Suelos del Uruguay a escala 1:1.000.000 (D.S.F.) con un índice de Productividad de 149 (Altamirano et al., 1976). Los suelos dominantes son Brunosoles Eutrícos Lúvicos, de color pardo muy oscuro, textura franco arcillo limosa, fertilidad alta y moderada a imperfectamente bien drenados. El experimento se instaló sobre un cultivo de soja y dentro de un sistema de rotación con pasturas.

En INIA, el suelo donde se realizó el experimento es un Brunosol Eutríco Típico. Se encuentra sobre posiciones de lomadas con pendientes suaves y moderadas. Son suelos de un color pardo muy oscuro y una textura franco arcillo limosa. El área donde se instaló el experimento cuenta con varios años de agricultura y se sembró sobre un cultivo de soja.

4.3 DISEÑO EXPERIMENTAL

Consta de una red de cuatro experimentos, cada uno con un diseño en bloques completamente al azar. Cada experimento contó con tres bloques y once tratamientos con diferentes especies y combinaciones de CS. El área de la unidad experimental fue de aproximadamente 170 m². Para este trabajo final de grado se seleccionaron cinco tratamientos en representación de un cultivo puro de leguminosas, puro de gramíneas, dos mezclas de especies y un barbecho sucio (testigo).

Figura 3
Esquema del diseño experimental



4.4 MANEJO DE LOS SITIOS

La siembra de los CS se realizó en todos los sitios entre el 13 de mayo y el 10 de junio. Las densidades de semilla y la fertilización a la siembra se presentan en la Tabla 1. La siembra se realizó a una profundidad de 1,5 cm.

Tabla 1
Información de manejo de tratamientos

Tratamiento	Especies	Densidad de siembra kg ha ⁻¹	Fertilización kg ha ⁻¹
1	<i>Avena byzantina</i>	52	50 / Urea + 100 / 7-40-0
2	<i>Barbecho químico</i>	-	-
3	<i>Vicia villosa</i>	30	100 / 7-40-0
4	<i>Avena strigosa + Vicia villosa</i>	16 + 25	100 / 7-40-0
5	<i>Avena byzantina + Vicia villosa</i>	21 + 25	100 / 7-40-0

Nota. Tomado de S. Álvarez (comunicación personal, 27 de agosto, 2024)

Los CS se suprimieron entre el 12 de octubre y el 18 de noviembre, generando ciclos de entre 130 y 180 días aproximadamente. La siembra de maíz se realizó entre el 21 de noviembre y el 15 de diciembre con el híbrido PWUE 2021 buscando lograr 60.000 pl. ha⁻¹. El largo de los barbechos fue entre 30 a 70 días aproximadamente. En la Tabla 2

se presenta un detalle de las fechas de supresión de los cultivos y su respectivo manejo según año y localidad.

Tabla 2

Siembra y aplicaciones de herbicidas en CS, barbecho y cultivo de maíz

		Actividad	Herbicidas	Dosis
EEMAC	INIA			lt o kg/ha
<i>Año 2022</i>				
6/5	15/5	Aplicación pre siembra	Glifosato - Paraquat	3 - 2
13/5	20/5	Siembra de los CS		
19/9	6/10	Desección CS gramínea	Clethodim	0,8
17/10	18/11	Desección todos los CS	Clethodim – Glifosato - Amina	0,8 – 3 - 2
			S-metolaclor -	1,5
	10/12	Aplicación pre emergentes maíz	Isoxaflutole + Cyprosulfamida	
			Thiencarbazone methyl	0,4
15/11	10/12	Aplicación pre emergentes maíz	Glifosato - dicamba	3 – 0,7
21/11	15/12	Siembra maíz	PWUE 2021	
<i>Año 2023</i>				
1/6	10/6	Aplicación pre siembra	Glifosato - Paraquat	3 - 2
6/6	10/6	Siembra de los CS		
12/10	8/11	Desección CS	Glifosato – Dicamba - Clethodim	3 – 0,7 - 1
			S-metolaclor -	1,5 –
21/11	10/12	Aplicación pre emergentes maíz	Isoxaflutole + Cyprosulfamida	
			Thiencarbazone methyl -	0,4 -
			Glifosato	3
23/11	12/12	Siembra maíz	PWUE 2021	

Nota. Tomado de S. Álvarez (comunicación personal, 27 de agosto, 2024)

4.5 EVALUACIONES

4.5.1 Muestreo de biomasa y análisis de nitrógeno en planta

La biomasa de los CS se relevó previo a supresión en cada experimento. El procedimiento consistió en realizar cuatro cortes de biomasa aérea con un cuadro de 0.25 m² que se colocó aleatoriamente dentro de cada parcela. Se separó biomasa de los CS de

la biomasa de malezas y se pesó en el campo la muestra total de los CS. Para el caso de las mezclas se pesó cada componente por separado. Posteriormente se tomó una muestra representativa y se volvió a pesar la submuestra en fresco. Se dejó en estufa por 48 horas a 60°C y se pesó la submuestra en seco para obtener el porcentaje de MS. Con este valor se calculó la MS del peso fresco total y se estimó la productividad por hectárea de biomasa seca aérea (kg MS ha^{-1}).

La concentración de N se obtuvo luego de agrupar las muestras según tratamiento (separando los componentes de cada mezcla) en una única bolsa. Estas se analizaron mediante el método Kjeldahl. A partir del valor de la concentración de N se multiplicó por la biomasa aérea producida para determinar la captura de N de los CS. Se utilizaron valores de carbono de los CS sembrados en INIA mediante método de calcinación para determinar la C/N de todos los CS. Cabe destacar que los valores de carbono son relativamente estables, por lo que solo se utilizaron los de INIA.

4.5.2 Muestreo de suelo

El muestreo de suelo se realizó a siembra, estado vegetativo y madurez fisiológica del cultivo de maíz. Se analizaron 5 tratamientos no fertilizados por bloque (en total 15 tratamientos). Por tratamiento se tomaron 8 sub muestras con calador a 15 cm para hacer una muestra compuesta y de cada sub muestra se dividió las mismas a la mitad, a los 7,5 cm, para separar y diferenciar el perfil más superficial del más profundo. De este modo se extrajeron 30 muestras compuestas totales, 15 correspondientes al perfil del suelo superior (0 - 7,5 cm) y las demás al perfil inferior de suelo (7,5 - 15cm). En laboratorio se secó las muestras en hornos a 60 °C durante 48 horas, se molió la tierra y posteriormente se realizaron análisis de N-NO_3^- .

5 MODELO ESTADISTICO

El modelo estadístico presentado es un modelo lineal mixto que sigue la estructura de Diseño en Bloques Completos al Azar (DBCA) con anidamiento, considera diferentes efectos fijos y aleatorios para analizar una variable de respuesta en un experimento con múltiples factores. El modelo evalúa cómo influyen diferentes tratamientos en la variable de respuesta considerando la variabilidad introducida por la ubicación geográfica, el año de evaluación y la estructura de bloque dentro de cada lugar. No existe interacción bloque-tratamiento, los tratamientos no se ven afectados de forma diferencial por ningún bloque. Además, se examinan interacciones clave (tratamiento * lugar y tratamiento * año) para detectar posibles variaciones en la respuesta bajo diferentes condiciones experimentales.

$$Y_{ijkh} = \mu + \tau_i + L_j + \beta(L)\kappa(j) + Ah + \tau_L(ij) + \tau_A(jh) + \varepsilon_k(ijh)$$

Donde:

- Y_{ijkh} = Variable de respuesta observada
- μ = Media general
- T_i = Efecto del tratamiento
- L_j = Efecto del lugar
- $\beta(L)$ = efecto del bloque anidado al lugar
- A = Efecto del año
- ε = Error experimental
- $i = (1, \dots, 5)$
- $j = (1, 2)$
- $\kappa = (1, \dots, 3)$
- $h = (1, 2)$

6 CARACTERIZACION CLIMATICA

6.1 PRECIPITACIONES

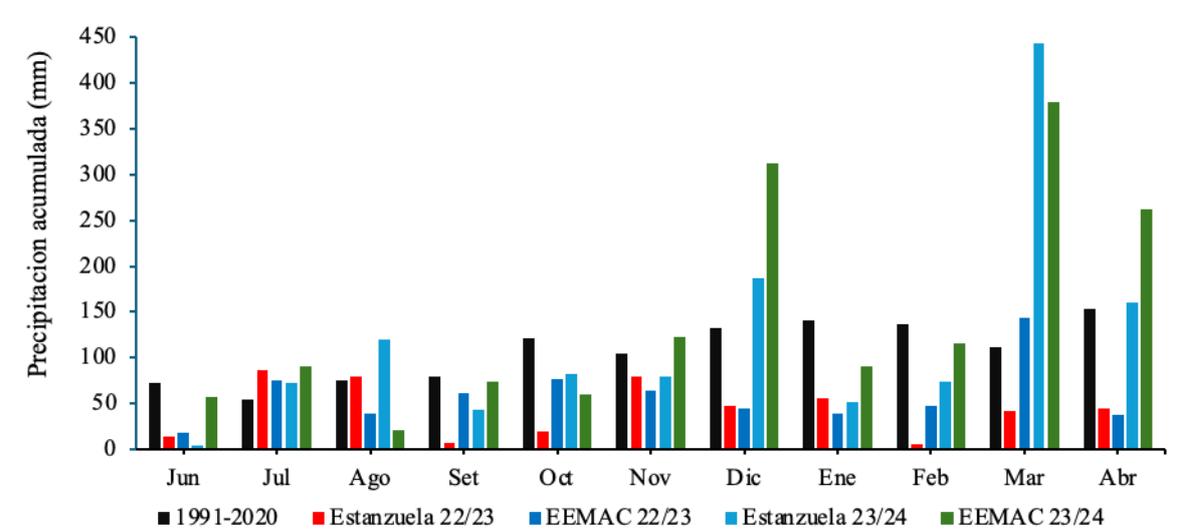
La temporada 2022-2023 presentó precipitaciones por debajo del promedio histórico en la mayoría de los meses. Mientras que la temporada 2023-2024 muestra valores superiores en varios meses relevantes (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria [INIA], s.f.; Instituto Uruguayo de Meteorología [INUMET], s.f.; S. Álvarez, comunicación personal, 27 de agosto, 2024).

Para la temporada 2022-2023, se registraron precipitaciones con un patrón de lluvias similar a la media histórica en ambas localidades durante el invierno (julio-agosto). Sin embargo, este período se caracterizó por poseer una primavera (en INIA) y verano (en EEMAC e INIA) con un severo déficit hídrico que llevó a la pérdida del cultivo de maíz en ambas zonas (INIA, s.f.; INUMET, s.f.; S. Álvarez, comunicación personal, 27 de agosto, 2024).

Para la temporada 2023-2024 durante el invierno (junio-agosto), las lluvias se mantuvieron cercanas al promedio histórico. En primavera (septiembre-noviembre), se registraron precipitaciones superiores al promedio histórico, destacándose especialmente en la localidad de EEMAC. A partir del verano (diciembre-marzo), las precipitaciones aumentaron considerablemente, alcanzando niveles extremos en marzo y abril, donde se superaron ampliamente los registros históricos (Figura 4) (INIA, s.f.; INUMET, s.f.; S. Álvarez, comunicación personal, 27 de agosto, 2024).

Figura 4

Precipitaciones mensuales durante temporada 2022-2024 en INIA y EEMAC en comparación con datos históricos (1991-2020)



Nota. Elaborado a partir de datos obtenidos de climatología INUMET (s.f.), INIA (s.f.), y S. Álvarez (comunicación personal, 27 de agosto, 2024).

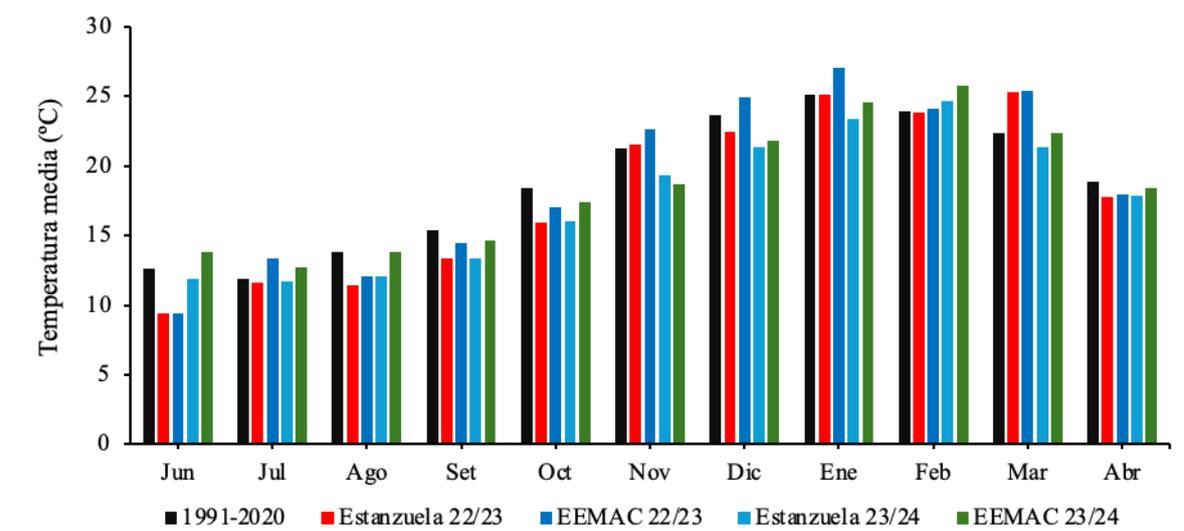
En términos generales, las temperaturas en los años de estudio se mantuvieron dentro del rango de los valores históricos, aunque con ligeras variaciones. Durante los meses de invierno (junio-agosto), las temperaturas de los últimos años tienden a ser similares o ligeramente inferiores a las históricas, mientras que en los meses cálidos (octubre-marzo) se observa un leve aumento, especialmente en enero y marzo (INIA, s.f.; INUMET, s.f.; S. Álvarez, comunicación personal, 27 de agosto, 2024).

Al comparar las dos localidades, EEMAC registra temperaturas más altas que INIA la Estanduela en los meses de agosto, septiembre, octubre, febrero y marzo, lo que sugiere diferencias microclimáticas entre ambas ubicaciones (INIA, s.f.; INUMET, s.f.; S. Álvarez, comunicación personal, 27 de agosto, 2024).

En cuanto a la comparación entre los períodos, 2023/2024 muestra una disminución de temperatura en los meses de junio, julio, octubre y diciembre respecto a 2022/2023, aunque sin diferencias marcadas en los demás meses. Estos datos indican una variabilidad climática dentro de los rangos históricos, con diferencias locales entre las estaciones de medición (Figura 5) (INIA, s.f.; INUMET, s.f.; S. Álvarez, comunicación personal, 27 de agosto, 2024).

Figura 5

Temperaturas mensuales durante temporada 2022-2024 en INIA y EEMAC en comparación con datos históricos (1991-2020)



Nota. Elaborado a partir de datos obtenidos de climatología INUMET (s.f.), INIA (s.f.), y S. Álvarez (comunicación personal, 27 de agosto, 2024).

7 RESULTADOS Y DISCUSION

7.1 EFECTO DEL TRATAMIENTO, AÑO Y LOCALIDAD EN LAS VARIABLES EVALUADAS

La biomasa seca producida (MS_CS) se vio afectada por el tratamiento ($p \leq 0.0001$) y la localidad ($p \leq 0.01$). Existió una tendencia asociada al año ($p \leq 0.1$) y no se encontraron interacciones entre el tratamiento con el año y el lugar ($p > 0.1$). En cuanto al N en biomasa aérea del CS (N_CS), se vio un efecto similar del tratamiento, la localidad y el año, con el agregado de que se observaron interacciones entre el tratamiento con el año y la localidad ($p \leq 0.005$). Lo cual indica que la absorción de N por los CS se ordenó de manera diferente en función de las condiciones edafoclimáticas. Respecto a la relación C/N (C/N_CS), se encontró un efecto significativo del tratamiento, el año y la localidad ($p \leq 0.005$). Sin embargo, las interacciones no fueron significativas ($p > 0.1$).

Respecto a los valores de N-NO_3^- en suelo mayormente se encontró que tanto los tratamientos como el año y la localidad mostraron un efecto significativo ($p \leq 0.05$) en los distintos períodos, siembra de maíz, periodo vegetativo (V6) y madurez fisiológica (MF) además de los diferentes estratos de suelo, 0 – 7,5, 7,5 – 15 y 0 – 15. Con la excepción de algunos estratos y períodos puntuales para ciertos factores (*Tabla 3*). Aunque en menor medida, también se encontró interacciones entre el tratamiento con el año y el lugar para algunos de los períodos y variables. Especialmente para la interacción tratamiento*lugar para el nivel de N-NO_3^- a MF y de tratamiento*año para siembra y estado fisiológico de maíz V6.

Tabla 3*Interacciones y efecto año y localidad entre los tratamientos y las variables evaluadas*

Variable	MS_CS	N_CS	CN_CS	N-NO ₃ ⁻ _S1	N-NO ₃ ⁻ _S2	N-NO ₃ ⁻ _Sx	N-NO ₃ ⁻ _V61	N-NO ₃ ⁻ _V62	N-NO ₃ ⁻ _V6x	N-NO ₃ ⁻ _MF1	N-NO ₃ ⁻ _MF2	N-NO ₃ ⁻ _MFx
Tratamiento	****	****	****	****	****	****	+	****	***	*	**	**
Año	+	*	***	****	****	****	****	****	****	**	NS	*
Localidad	**	***	***	+	***	***	***	*	NS	***	***	***
Tratamiento*Lugar	NS	****	NS	NS	*	*	NS	+	+	**	***	***
Tratamiento*Año	NS	***	NS	***	NS	***	NS	***	**	NS	+	NS

Nota. Símbolos indican el grado de significancia estadística. P-valor: $\leq 0,0001$: ****; $\leq 0,005$: ***; $\leq 0,01$: **, $\leq 0,05$: *, $\leq 0,1$: +; $> 0,1$: NS. MS_CS: biomasa seca de CS; N_CS: N capturado por CS; CN_CS: relación C/N en CS; N-NO₃⁻_S1: Nitrato a la siembra de 0 - 7,5 cm; N-NO₃⁻_S2: Nitrato a la siembra de 7,5 - 15 cm; N-NO₃⁻_Sx: Nitrato a la siembra de 0 - 15 cm; N-NO₃⁻_V61: Nitrato a V6 de 0 - 7,5 cm; N-NO₃⁻_V62: Nitrato a V6 de 7,5 - 15 cm; N-NO₃⁻_V6x: Nitrato a V6 de 0 - 15 cm; N-NO₃⁻_MF1: Nitrato a madurez fisiológica de 0 - 7,5 cm; N-NO₃⁻_MF2: Nitrato a madurez fisiológica de 7,5 - 15 cm; N-NO₃⁻_MFx= Nitrato a madurez fisiológica de 0 - 15 cm.

Los resultados muestran un efecto significativo de los tratamientos sobre la biomasa seca (MS_CS), el N capturado (N_CS), la relación C/N (CN_CS) y los niveles de N-NO₃⁻ en distintas etapas del cultivo. Esto es consistente con lo reportado por Finney et al. (2017), quienes destacaron que la elección del grupo funcional de los CS determina la cantidad de biomasa producida, la calidad de esta y la dinámica de N en el sistema. Explica por la capacidad de FBN de los CS, principalmente leguminosas, y su acumulación en biomasa con diferentes grados de concentración, lo cual determina la CN_CS e influye directamente en la disponibilidad del dicho nutriente en el suelo (Finney et al., 2017; Peoples et al., 2009).

Además del impacto de los tratamientos, las variables evaluadas fueron significativamente influenciadas por la localidad y el año. Esto subraya la importancia de los factores agroclimáticos y el historial de manejo del suelo en la respuesta de los CS. Fassana et al. (2022) señalaron que el uso agrícola previo de un sitio puede modificar la estructura del suelo y su capacidad para retener y liberar N. En este estudio, las diferencias en el historial de manejo fueron evidentes entre las localidades. En EEMAC, el sistema

incluía rotaciones con pasturas, mientras que en INIA La Estanzuela predominaba una secuencia de agricultura continua. Estas diferencias pudieron influir en la productividad de los CS y en la dinámica del N en el suelo.

Asimismo, la interacción entre el tratamiento y la localidad resultó significativa para varias variables evaluadas, lo que indica nuevamente que las condiciones agroclimáticas y el historial de manejo del suelo pueden modificar la respuesta de los CS en términos de acumulación de N en biomasa y disponibilidad de N en suelo. Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Thorup-Kristensen (1994), quien observó que las diferencias edafoclimáticas entre sitios afectan el crecimiento de los CS y su eficiencia en la captación de N.

El efecto año se explica principalmente por la variabilidad entre los años evaluados. El estudio contó con dos años climáticamente contrastantes: un período de sequía intensa (verano de 2022/2023) que favoreció procesos que permitieron una mayor acumulación de N-NO_3^- en el suelo; y un segundo período con abundantes precipitaciones post desecación de los CS (diciembre 2023, ver *Figura 4*), lo que pudo provocar un mayor lavado de N-NO_3^- en suelo y, por ende, una menor disponibilidad de estos. Al efecto clima se suma el propio manejo de cada experimento. La siembra de los CS más temprana en el primer año, permitió mejores condiciones para el crecimiento y desarrollo de los cultivos (mayor aporte de N total) Según Siri-Prieto y Ernst (2011) los CS necesitan aproximadamente 150 días de crecimiento para alcanzar $4\text{-}5 \text{ t ha}^{-1}$ de biomasa seca. Además, un mayor tiempo de barbecho en el primer año, posibilitó una mayor acumulación de N-NO_3^- en suelo. Kaye y Quemada (2017) destacaron que tanto el manejo del barbecho como las condiciones climáticas inciden en la tasa de mineralización del N y su disponibilidad para el cultivo siguiente.

En conjunto, los hallazgos de este trabajo de grado subrayan la importancia de considerar no solo la elección del CS, sino también el contexto agroclimático y el historial del suelo para optimizar la producción de biomasa y la dinámica del N en los sistemas agrícolas. La interacción entre tratamiento, localidad y año demuestra que no existe una estrategia única, sino que el manejo debe ajustarse a las condiciones específicas de cada ciclo productivo.

En los siguientes capítulos se profundiza en los efectos de los tratamientos, el año y la localidad en la producción de biomasa seca, calidad del residuo y dinámica de N-NO₃-s en suelo.

7.2 CORRELACIONES ENTRE VARIABLES ANALIZADAS

A mayor producción de biomasa (MS_CS) mayor es el contenido de N (N_CS) (0,68, $p \leq 0,0001$). Existió una correlación moderada y negativa entre el N en CS y la relación C/N (CS_C/N) (-0,41, $p \leq 0,005$). Dentro de las variables asociadas a la biomasa de los CS, el N_CS fue el que presentó mayor cantidad de correlaciones significativas con el nivel de N-NO₃⁻ en suelo (N-NO₃⁻_S₂, N-NO₃⁻_MF₁, N-NO₃⁻_MF₂ y N-NO₃⁻_MF_X). De manera general se observó una correlación muy fuerte y significativa entre los niveles de N-NO₃⁻ en el suelo en las distintas profundidades y a lo largo del tiempo (Tabla 4).

Tabla 4

Correlación de variables estudiadas

	MS_CS	N_CS	CN_CS	N-NO ₃ ⁻ _S ₁	N-NO ₃ ⁻ _S ₂	N-NO ₃ ⁻ _S _X	N-NO ₃ ⁻ _V ₆₁	N-NO ₃ ⁻ _V ₆₂	N-NO ₃ ⁻ _V _{6X}	N-NO ₃ ⁻ _MF ₁	N-NO ₃ ⁻ _MF ₂	N-NO ₃ ⁻ _MF _X
MS_CS		****	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*	+	+
N_CS	0,68		***	NS	*	NS	NS	NS	NS	***	***	***
CN_CS	0,32	-0,41		NS	***	NS	NS	NS	NS	NS	+	NS
N-NO ₃ ⁻ _S ₁	0,03	0,18	-0,13		****	****	****	****	****	****	****	****
N-NO ₃ ⁻ _S ₂	-0,10	0,29	-0,47	0,65		****	****	***	****	****	****	****
N-NO ₃ ⁻ _S _X	0,02	0,22	-0,18	0,98	0,74		****	****	****	****	****	****
N-NO ₃ ⁻ _V ₆₁	-0,12	0,05	-0,13	0,82	0,50	0,82		****	****	****	****	****
N-NO ₃ ⁻ _V ₆₂	-0,16	-0,03	-0,07	0,83	0,41	0,81	0,80		****	****	****	****
N-NO ₃ ⁻ _V _{6X}	-0,15	0,05	-0,16	0,85	0,52	0,84	0,98	0,88		****	****	****
N-NO ₃ ⁻ _MF ₁	0,30	0,46	-0,26	0,79	0,77	0,83	0,86	0,61	0,83		****	****
N-NO ₃ ⁻ _MF ₂	0,27	0,45	-0,26	0,76	0,81	0,81	0,82	0,55	0,79	0,88		****
N-NO ₃ ⁻ _MF _X	0,30	0,44	-0,24	0,80	0,80	0,85	0,87	0,61	0,84	0,99	0,91	

Nota. Símbolos indican el grado de significancia estadística. P-valor: $\leq 0,0001$: ****; $\leq 0,005$: ***; $\leq 0,01$: **; $\leq 0,05$: *; $\leq 0,1$: +; $> 0,1$: NS. MS_CS: biomasa seca de CS; N_CS: N capturado por CS; CN_CS: relación C/N en CS; N-NO₃⁻_S₁: Nitrato a la siembra de 0 - 7,5 cm; N-NO₃⁻_S₂: Nitrato a la siembra de 7,5 - 15 cm; N-NO₃⁻_S_X: Nitrato a la siembra de 0 - 15 cm; N-NO₃⁻_V₆₁: Nitrato a V6 de 0 - 7,5 cm; N-NO₃⁻_V₆₂: Nitrato a V6 de 7,5 - 15 cm; N-NO₃⁻_V_{6X}: Nitrato a V6 de 0 - 15 cm; N-NO₃⁻_MF₁: Nitrato a madurez fisiológica de 0 - 7,5 cm; N-NO₃⁻_MF₂: Nitrato a madurez fisiológica de 7,5 - 15 cm; N-NO₃⁻_MF_X: Nitrato a madurez fisiológica de 0 - 15 cm.

Una mayor producción de MS está asociada con una mayor retención de N en los residuos. Este hallazgo es consistente con lo señalado por Kaye y Quemada (2017), quienes destacaron que los CS pueden mejorar la eficiencia de N al capturarlo en sus tejidos y reducir su lixiviación, asegurando una disponibilidad progresiva para los cultivos posteriores.

La correlación positiva entre N_CS y la cantidad de N-NO₃⁻ en diferentes momentos del ciclo del cultivo (N-NO₃⁻_Sx, N-NO₃⁻_V6x, N-NO₃⁻_MFx) sugiere que los cultivos de servicio con mayor aporte de N generan un mayor contenido de N-NO₃⁻ en el suelo. Esto podría deberse a la descomposición progresiva de sus residuos, lo que influye en la liberación de N-NO₃⁻ a lo largo del ciclo del cultivo. La sincronización entre la mineralización del N y la demanda del cultivo es clave para mejorar la eficiencia en su uso (Liu et al., 2020; Ross et al., 2015). En este sentido, el uso de mezclas de gramíneas y leguminosas podría optimizar esta liberación, proporcionando un equilibrio entre la disponibilidad inmediata y sostenida de N en el sistema productivo (Finney et al., 2016).

Se evidencia como la disponibilidad de N en etapas tempranas está estrechamente relacionada con su disponibilidad en etapas más avanzadas del cultivo. Esto sugiere que una mayor acumulación de N-NO₃⁻ en etapas tempranas se traduce en una mayor disponibilidad en momentos posteriores del cultivo. Estos resultados son consistentes con lo señalado por Thorup-Kristensen (1994), quien enfatizó la importancia de una acumulación inicial adecuada de N mineral en el suelo para garantizar una nutrición sostenida en fases críticas del desarrollo del cultivo.

7.3 PRODUCCION Y APORTE DE N DE LOS CS

Existieron diferencias significativas entre tratamientos para las variables MS_CS, N_CS y CN_CS ($p \leq 0,05$). Los tratamientos que incorporaron gramíneas ya sea puras o en mezcla fueron los que lograron los mayores niveles de MS_CS ($p \leq 0,05$), diferenciándose de *Vicia villosa* y la biomasa seca producida por el barbecho sucio. Los mayores niveles de N_CS fueron encontrados en los CS que incluyeron *Vicia villosa* ($p \leq 0,05$), ya sea pura o en mezcla con gramíneas. La C/N de *Vicia villosa* pura fue la de menor valor, seguida por los CS que incorporaron a *Vicia villosa*, siendo el de mayor relación C/N la *Avena byzantina* ($p \leq 0,05$).

EEMAC presentó valores más altos de MS_CS, C/N_CS y N_CS en comparación con INIA ($p \leq 0,05$). Si bien el año no afectó la MS_CS de los tratamientos, si se encontró que en 2022 el aporte de N y la relación C/N fue mayor que en 2023 ($p \leq 0,05$).

Tabla 5

Resultados de biomasa seca, N en biomasa seca y relación C/N de los CS

Tratamiento		MS_CS	N_CS	C/N_CS	
EEMAC	<i>Vicia villosa</i>	4700	bc	195 a	10 d
EEMAC	<i>Avena strigosa</i> + <i>Vicia villosa</i>	7524	a	174 a	19 cd
EEMAC	<i>Avena byzantina</i> + <i>Vicia villosa</i>	6589	ab	151 a	19 cd
EEMAC	<i>Avena byzantina</i>	7394	a	85 b	37 ab
EEMAC	<i>Barbecho</i>	1052	d	19 c	24 c
INIA	<i>Vicia villosa</i>	2303	cd	52 bc	19 cd
INIA	<i>Avena strigosa</i> + <i>Vicia villosa</i>	5413	ab	83 b	28 bc
INIA	<i>Avena byzantina</i> + <i>Vicia villosa</i>	4114	bc	73 bc	24 c
INIA	<i>Avena byzantina</i>	5296	ab	53 bc	43 a
INIA	<i>Barbecho</i>	1419	d	25 c	25 c
Localidad					
EEMAC		5452	a	125 a	28 a
INIA		3709	b	57 b	22 b
Año					
2022		4784	a	97 a	27 a
2023		4376	a	85 b	22 b

Nota. Letras iguales indican el grado de significancia estadística. MS_CS: biomasa seca de CS; N_CS: N capturado por CS; CN_CS: relación C/N en CS

Avena byzantina y las mezclas de gramíneas con *Vicia villosa* presentaron los mayores niveles de MS_CS. Las gramíneas suelen presentar mayores niveles de biomasa seca en comparación con las leguminosas, lo cual está relacionado con su mayor eficiencia en la captura y uso de la radiación solar. Betancourt et al. (2005) evaluaron la eficiencia en el uso de la radiación de especies forrajeras (no abordadas en este trabajo final) en la cuenca del río Coxacoaco, México. Encontraron que el pasto Rhodes (*Chloris gayana*) produjo 1,77 g de MS por MJ de radiación interceptada, mientras que la alfalfa (*Medicago sativa*) solo alcanzó 1,32 g de MS por MJ de radiación interceptada.

Si bien aquellos tratamientos que incluyeron gramíneas destacaron en términos de biomasa, todos lo que incluyeron *Vicia villosa* presentaron una mayor capacidad de

captación de N, lo que concuerda con estudios que reportan su eficiencia en la FBN mediante su asociación con bacterias del género *Rhizobium* (Peoples et al., 2009; Pinto, 2018). Esto se traduce en un aporte significativo de N al sistema productivo, lo que puede beneficiar al cultivo sucesor y reducir la dependencia de fertilizantes sintéticos.

Los CS mezclas lograron un equilibrio entre producción de biomasa y captura de N, lo que permite aprovechar las ventajas de ambos grupos funcionales. Finney et al. (2017) encontraron que este tipo de combinaciones favorecen la estabilidad en la producción de biomasa y la eficiencia en la utilización de recursos, promoviendo sistemas agrícolas más resilientes ante la variabilidad climática y edáfica.

Por otro lado, la relación C/N varió significativamente entre tratamientos. Las gramíneas presentaron valores más altos, lo que indica una descomposición más lenta, promoviendo una liberación progresiva de N en el suelo. En contraste, las leguminosas mostraron valores más bajos de C/N, lo que podría facilitar una rápida mineralización y liberación de N, beneficiando la nutrición del cultivo sucesor (Finney et al., 2016; Unkovich et al., 2008).

Las mezclas lograron valores intermedios de C/N, lo que sugiere una liberación gradual de N, evitando tanto la inmovilización prolongada como la pérdida rápida del nutriente. Ordóñez-Fernández et al. (2018) destacan que este balance es clave para mantener la fertilidad del suelo y optimizar la disponibilidad de N en sistemas agrícolas sostenibles.

La localidad en general tuvo un impacto significativo en la biomasa y la captura de N, lo que puede estar relacionado con diferencias en el manejo histórico del suelo y las condiciones edafoclimáticas de cada sitio (Ernst et al., 2016). Por otro lado, el manejo entre años también condiciona los resultados. Mientras que el primer año en estudio los CS se sembraron antes, en el segundo año la fecha de siembra fue más tardía, generando menor N en CS y menor relación C/N. Los CS sembrados en fechas tardías tienden a presentar menores contenidos de N en su biomasa y una relación C/N también más baja. Esto se debe a la reducción del tiempo de crecimiento. Al implantarse tardíamente disponen de menos días con temperaturas y radiación solar adecuadas, lo cual limita la fotosíntesis y por consiguiente la acumulación de carbono, en gramíneas principalmente, y la fijación biológica de N en leguminosas (Álvarez et al., 2012; Clark, 2007).

7.4 EFECTO DE LOS CS EN EL NIVEL DE N-NO₃⁻ EN SUELO

En la etapa de siembra, *Vicia villosa* presentó el nivel más alto de N-NO₃⁻ seguida por las mezclas (*Avena strigosa* + *Vicia villosa* y *Avena byzantina* + *Vicia villosa*). El tratamiento de *Avena byzantina* pura mostró el nivel más bajo de N-NO₃⁻ en suelo. Al comparar entre años, en 2022 los niveles de N-NO₃⁻ fueron significativamente más altos en todos los tratamientos en comparación al año 2023, donde los valores de N-NO₃⁻ en la siembra fueron más bajos en todos los tratamientos.

En la etapa V6, el tratamiento de *Avena byzantina* pura presentó un nivel significativamente menor en comparación con el resto de los tratamientos. A nivel temporal, en 2022 los niveles de N-NO₃⁻ en V6 continuaron siendo mayores que en el año 2023. Adicionalmente se observa una mayor estabilidad en los resultados de N-NO₃⁻ entre siembra, V6 y MF en el año 2022. Por otra parte, en 2023 los valores de N-NO₃⁻ son menores que en 2022 en todo el ciclo, pero se mantienen estables entre siembra y V6 y posteriormente aumentan en MF.

Al finalizar la etapa del cultivo de maíz, MF, *Vicia villosa* registró el nivel más alto de N-NO₃⁻, seguida por *Avena strigosa* + *Vicia villosa* y *Avena byzantina* + *Vicia villosa*, mientras que *Avena byzantina* pura mantuvo el nivel más bajo. Comparando entre años, en 2022 se mantuvieron niveles relativamente altos de N-NO₃⁻ al final del ciclo, mientras que en 2023 los niveles fueron mucho más bajos en todos los tratamientos.

Tabla 6Niveles de $N-NO_3^-$ en distintas etapas del cultivo de maíz según CS antecesor y año

Año	Tratamiento	$N-NO_3^-$ a Siembra x		$N-NO_3^-$ a V6 x		$N-NO_3^-$ a MF x	
2022	<i>Vicia villosa</i>	28	a	30	a	34	a
2022	<i>Avena strigosa</i> + <i>Vicia villosa</i>	24	ab	28	a	28	ab
2022	<i>Avena byzantina</i> + <i>Vicia villosa</i>	17	bc	26	a	23	abc
2022	<i>Avena byzantina</i>	12	cde	11	bc	10	bc
2022	Barbecho	16	bcd	21	ab	31	ab
2023	<i>Vicia villosa</i>	8	de	8	c	21	acd
2023	<i>Avena strigosa</i> + <i>Vicia villosa</i>	4	e	6	c	24	abc
2023	<i>Avena byzantina</i> + <i>Vicia villosa</i>	5	e	6	c	18	abc
2023	<i>Avena byzantina</i>	4	e	5	c	5	c
2023	Barbecho	6	e	7	c	13	bc
Localidad							
EEMAC		14	a	16	a	32	a
INIA		11	b	14	a	9	b
Año							
2022		19	a	23	a	25	a
2023		6	b	6	b	16	b

Nota. Letras indican el grado de significancia estadística. $N-NO_3^-$ a Siembra x: Nitrato a la siembra de 0 - 15 cm; $N-NO_3^-$ V6 x: Nitrato a V6 de 0 – 15 cm; $N-NO_3^-$ MF x: Nitrato a madurez fisiológica de 0 – 15 cm.

Los resultados presentados en la Tabla 6 reflejan el impacto de los CS, el año y la localidad en los niveles de $N-NO_3^-$ en el suelo en distintas etapas del ciclo del cultivo de maíz. En general, los valores de $N-NO_3^-$ a la siembra, en V6 y MF fueron significativamente más altos en los tratamientos que incorporaron *Vicia villosa*, en comparación con los tratamientos de gramíneas y barbecho. Esto se debe a la capacidad de las leguminosas para fijar N atmosférico y aumentar su disponibilidad en el suelo (Peoples et al., 2009).

Luego del cultivo de *Vicia villosa* se obtuvieron los niveles más altos de $N-NO_3^-$, mientras que las gramíneas mostraron los valores más bajos, reflejando su capacidad para inmovilizar N en la biomasa. Estos resultados coinciden con hallazgos que señalan que los sistemas basados en leguminosas incrementan la acumulación de $N-NO_3^-$ en el suelo, mientras que las gramíneas lo retienen en el tiempo, reduciendo la disponibilidad inmediata de N. Las mezclas de leguminosas y gramíneas presentaron un comportamiento

intermedio, liberando N de manera más balanceada a lo largo del ciclo del cultivo. Esta combinación podría favorecer una sincronización más eficiente entre la liberación de N y la demanda del cultivo de maíz, evitando deficiencias en las primeras etapas y reduciendo pérdidas por lixiviación en etapas avanzadas (Finney et al., 2017; Kaye & Quemada, 2017).

El nivel de N-NO_3^- superior en 2022 en comparación con 2023, se puede atribuir a diferencias climáticas. Durante 2023, se registraron excesos hídricos y temperaturas más bajas, lo que enlenteció la descomposición de los residuos y aumentó la lixiviación de N-NO_3^- , reduciendo la disponibilidad de N en el suelo. Adicionalmente la lenta descomposición de residuos generó inmovilización temporal en las primeras etapas del ciclo del cultivo de maíz (Míguez & Bollero, 2018). En contraste, en 2022, condiciones de mayores temperaturas y menores precipitaciones favorecieron una mayor mineralización del N, aumentando la disponibilidad de este nutriente en el suelo.

El efecto de la localidad también fue relevante, aunque menor en comparación con el año. En EEMAC, se observaron valores de N-NO_3^- significativamente más altos en la siembra y en MF de maíz en comparación con INIA La Estanzuela. Esta diferencia puede estar explicada por la historia agrícola de cada sitio, ya que EEMAC ha tenido una rotación con pasturas, lo que ha contribuido a un mayor contenido de N potencial en el suelo (Fassana et al., 2022). Además, en EEMAC, las temperaturas registradas entre agosto y marzo en el período 2022/2023 fueron más elevadas que en INIA, lo que pudo haber favorecido una mayor mineralización del N, aumentando temporalmente la concentración de N-NO_3^- en el suelo (Ladha et al., 2005).

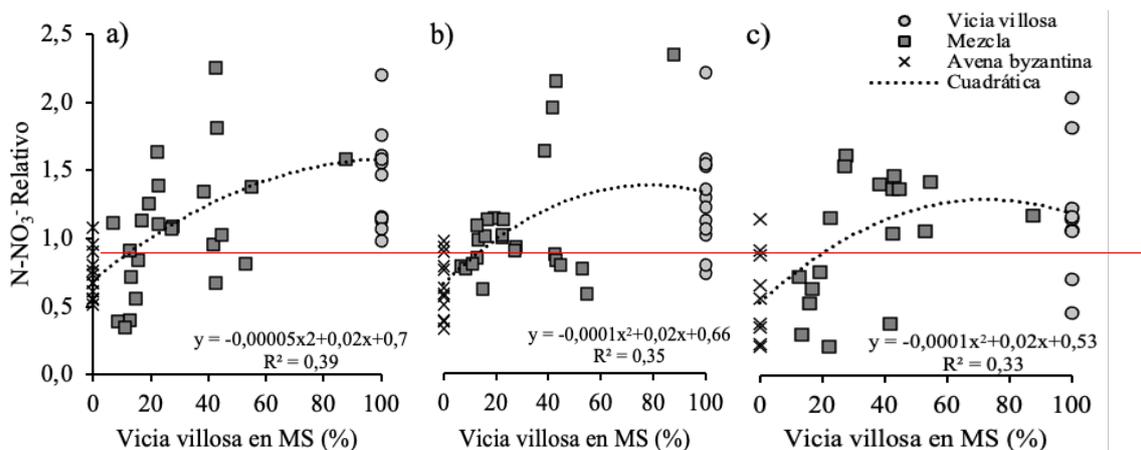
Los resultados obtenidos en los cuatro experimentos revelan el rol de las leguminosas en los niveles de N-NO_3^- en suelo. A medida que aumenta el porcentaje de leguminosas en MS, el contenido de N-NO_3^- tiende a incrementarse, aunque con una importante variabilidad (Figura 7a, 7b y 7c). Esto indica el importante rol que pueden cumplir las leguminosas como *Vicia villosa* en mejorar la dinámica de N del sistema, sin dejar de tener importancia otros factores pueden estar modulando la disponibilidad final de este nutriente en el suelo (como clima, suelo y manejo).

Los modelos cuadráticos ajustados presentan coeficientes de determinación (R^2 de 0,39, 0,35 y 0,33 en las Figuras 7a, 7b y 7c, respectivamente), lo que indica una

relación moderada entre la proporción de leguminosas en los CS y la disponibilidad de N-NO_3^- en el suelo post-CS. La línea roja ubicada en el valor 1 del eje Y indica el umbral donde el contenido de N-NO_3^- post-CS es igual al valor post-barbecho. En las tres gráficas, los puntos se distribuyen tanto por encima como por debajo de esta línea, lo que implica que en algunos casos los CS aumentan la disponibilidad de N-NO_3^- , mientras que en otros la reducen, posiblemente debido a efectos de inmovilización de nitrógeno por residuos con una alta relación C/N.

Figura 6

N-NO_3^- en distintas etapas del ciclo de maíz en función del porcentaje de leguminosas



Nota. Línea roja ubicada en el valor 1 del eje y, indica que el valor de N-NO_3^- post CS es igual al valor de N-NO_3^- post barbecho. Figura a) siembra, b) estado vegetativo, c) MF de maíz.

Los resultados obtenidos concuerdan con lo reportado por Thorup-Kristensen et al. (2003), quienes destacan que los CS desempeñan un papel clave en la dinámica de N en el suelo y su disponibilidad para el cultivo sucesor. En particular, leguminosas como *Vicia villosa* fijan N atmosférico y poseen una baja relación C/N (<15/1), lo que facilita la rápida mineralización del N orgánico, aumentando la cantidad de N inorgánico en la zona radicular del maíz. En un estudio realizado en el Valle Bonaerense del Río Colorado, se observó que el uso de *Vicia villosa* como cultivo de cobertura incrementó significativamente la disponibilidad de N en el suelo, alcanzando hasta 120 kg N ha^{-1} al momento de la siembra del maíz, lo que favoreció un aumento en el rendimiento del cultivo (Álvarez-Solís et al., 2016). En este trabajo se encontró que el contenido de N-NO_3^- se mantiene elevado a lo largo de todo el ciclo del cultivo, si bien en la medida que

avanza el ciclo la diferencia es menos acentuada (Figura 6). La tendencia cuadrática permite identificar rangos de porcentaje de *Vicia villosa* en la mezcla necesarios para lograr la máxima disponibilidad de N-NO_3^- . Se observa que aproximadamente una inclusión de 40% de leguminosas en los tratamientos mezcla maximizaría dicho nutriente.

Por otro lado, en sistemas dominados por gramíneas como *Avena byzantina*, la descomposición de los residuos es más lenta debido a su alta relación C/N, lo que genera una inmovilización temporal del N y reduce la disponibilidad de N-NO_3^- en las primeras etapas del maíz (Justes et al., 1994). Esto se observa en los resultados de los gráficos, donde las mezclas con un menor porcentaje de leguminosas y la *Avena byzantina* presentan los valores más bajos de N-NO_3^- , afectando la accesibilidad temprana de N para el cultivo en comparación a mantenerse en barbecho durante el invierno (línea roja). Lo que sugiere que la incorporación de gramíneas o mezclas con un bajo porcentaje de leguminosas podría requerir una mayor aplicación de fertilizantes nitrogenados para compensar la menor disponibilidad de N-NO_3^- en el suelo (Kaye & Quemada, 2017).

Durante la etapa V6 del maíz, la demanda de N es crítica para sostener su crecimiento acelerado (Kaye & Quemada, 2017). En este estudio, se observaron valores más elevados de N-NO_3^- en la leguminosa estudiada en comparación a las gramíneas. Las leguminosas liberan dicho nutriente rápidamente, asegurando un suministro adecuado en este momento clave. En contraste, los sistemas dominados por gramíneas retrasan la liberación de N, lo que podría limitar el desarrollo radicular y la acumulación de biomasa en esta fase (Drinkwater & Snapp, s.f.). La línea roja en las gráficas permite identificar, que en ciertos casos, la disponibilidad de N-NO_3^- post CS supera la del barbecho, lo que respalda el potencial de los CS para mejorar la fertilidad del suelo. Lo que concuerda con lo descrito por Miguez y Bollero (2018), quienes afirman que la cobertura y los residuos vegetales reducen la lixiviación de N-NO_3^- s, favoreciendo su acumulación en la superficie y aumentando la disponibilidad de N en la zona radicular. No obstante, los efectos varían según la composición del CS, reflejando la importancia de un manejo adecuado de las proporciones de leguminosas y gramíneas en las mezclas, para optimizar la disponibilidad de N-NO_3^- y mejorar la eficiencia en el uso de nutrientes.

En MF la disponibilidad de N residual en el suelo está determinada por la descomposición de los residuos de CS y la absorción por parte del maíz. Los resultados indican que los mayores niveles de N-NO_3^- residual se encontraron en sistemas con

leguminosas, lo que se ha visto reflejado en estudios previos que indican que estos sistemas aportan N más rápidamente (Peoples et al., 2009). En cambio, los sistemas dominados por gramíneas muestran valores más bajos de N-NO_3^- , reflejando la inmovilización del N en su biomasa, comprobándose en este trabajo mediante las gramíneas estudiadas. No obstante, esta característica puede ser beneficiosa a largo plazo, ya que reduce la lixiviación y mejora la eficiencia del uso de N en sistemas agrícolas sostenibles (Boccolini et al., 2019).

Los resultados obtenidos en este estudio respaldan la evidencia previa sobre el efecto de los CS en la disponibilidad de N en el suelo. La proporción de leguminosas en la mezcla es determinante en la liberación de N-NO_3^- , afectando la disponibilidad del nutriente en distintas etapas del crecimiento del maíz. Mientras que las leguminosas garantizan un suministro temprano y sostenido de N, las gramíneas podrían generar a futuro una retención y liberación gradual del nutriente, permitiendo una sincronización más eficiente con la demanda del maíz contribuyendo a la sostenibilidad de los sistemas agrícolas (Finney et al., 2017; Miguez & Bollero, 2018). Sin embargo, como se muestra en los resultados cuando la proporción de leguminosas en la mezcla supera el 80% puede generarse cierta lixiviación de N-NO_3^- . La desincronización entre la liberación de N por y la demanda del cultivo principal puede generar un riesgo potencial de pérdidas de N por lixiviación o volatilización, especialmente cuando la proporción de leguminosas en los cultivos de servicio es elevada. Esta problemática ha sido señalada por diversos estudios que destacan la importancia de ajustar la proporción de leguminosas y el momento de su incorporación al suelo para mejorar la sincronía entre la oferta y la demanda de N (Álvarez-Solis et al., 2016; Andrews et al., 2018; Stute & Posner, 1995).

8 CONCLUSION

Los resultados de esta serie de ensayos demuestran que se cumple con las hipótesis planteadas: 1) que CS mezcla de gramíneas con leguminosas logran mantener una alta productividad y buena calidad del residuo en distintos ambientes; y 2) que los CS que incluyen leguminosas mejoran la dinámica de N en suelo en comparación a barbechos largos o CS que no incluyen a esta especie.

Los tratamientos que combinaron *Avena strigosa* con *Vicia villosa*, así como los de *Avena byzantina* con *Vicia villosa*, obtuvieron una mayor producción de biomasa, comparable al tratamiento puro de *Avena byzantina*. Además, las mezclas lograron mayor aporte neto de N por FBN en los CS y una menor relación C/N, sin diferencias estadísticamente significativas respecto al tratamiento puro de *Vicia villosa*, sin diferencias significativas entre tratamientos. Estos resultados sugieren que las mezclas favorecen tanto la estabilidad en la producción de biomasa como el aporte de N al suelo.

El tratamiento puro de *Vicia villosa*, en comparación con el tratamiento puro de gramínea y el tratamiento testigo (barbecho sucio), alcanzó la menor relación C/N y presentó una mayor concentración de N-NO_3^- en el suelo, tanto al momento de la siembra como en las etapas fenológicas posteriores (V6 y MF) del ciclo del maíz. Además, se observó una relación cuadrática entre los niveles de N-NO_3^- y el porcentaje de *Vicia villosa* en la MS, logrando maximizar los niveles de N-NO_3^- con una inclusión aproximadamente del 40% de esta especie en las mezclas.

Por otro lado, el tratamiento puro de *Avena byzantina* presentó la mayor relación C/N, lo que resultó en una descomposición más lenta de los residuos y una inmovilización temporal de N, reduciendo la disponibilidad de N-NO_3^- al momento de la siembra del maíz.

Los factores agroclimáticos y el historial de manejo específico de cada localidad revelaron diferencias significativas en las variables estudiadas. En este contexto, el efecto del año, asociado principalmente al régimen de precipitaciones, resultó más relevante que el de la localidad en lo que respecta a la variabilidad de la concentración de N-NO_3^- en el suelo al momento de la siembra del cultivo de maíz.

Por lo tanto, al considerar la implementación de cultivos de cobertura en la rotación, es clave planificar, diseñar y manejar adecuadamente estas prácticas para maximizar los beneficios que aportan al sistema productivo.

9 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Altamirano, A., Silva, H., Durán, A., Echevarría, A., Panario, D., & Puentes, R. (1976). *Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay: Vol. 1. Clasificación de Suelos del Uruguay*. MAP. https://www.researchgate.net/publication/259496271_Carta_de_Reconocimiento_de_Suelos_del_Uruguay_Tomo_I_Clasificacion_de_Suelos
- Álvarez, C., Quiroga, A., Santos, D., & Bodrero, M. (Eds.). (2012). *Contribuciones de los cultivos de cobertura a la sostenibilidad de los sistemas de producción*. INTA. https://www.researchgate.net/publication/380889553_Contribuciones_de_los_cultivos_de_cobertura_a_la_sostenibilidad_de_los_sistemas_de_produccion
- Álvarez-Solis, J. D., Muñoz-Arroyo, R., Huerta-Lwanga, E., & Nahed-Toral, J. (2016). Balance parcial de nitrógeno en el sistema de cultivo de maíz (*Zea mays* L.) con cobertura de leguminosas en Chiapas, México. *Agronomía Costarricense*, 40(1), 29-39. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S0377-94242016000100029&script=sci_arttext
- Andrews, J. S., Sanders, Z. P., Cabrera, M. L., Saha, U. K., & Hill, N. S. (2018). Nitrogen dynamics in living mulch and annual cover crop corn production systems. *Agronomy Journal*, 110(4), 1309-1317. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.10.0609>
- Baigorria, T., Gómez, D., Cazorla, C., Lardone, A., Bojanich, M., Aimetta, B., Bertolla, A., Cagliero, M., Vilches, D., Rinaudo, D., & Canale, A. (2011). *Bases para el manejo de vicia como antecesor del cultivo de maíz*. Sitio Argentino de Producción Animal. https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pasturas%20artificiales/232-vicia.pdf
- Betancourt, P., Figueroa, B., & Ortiz, C. (2005). Erosion hídrica y uso de la radiación solar por especies forrajeras en la cuenca del río Coxacoaco, Mexico. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 22(2), 157-169. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-78182005000200006
- Bianchi, F. J. J. A., Booij, C. J. H., & Tschardtke, T. (2006). Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: A review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. *Proceedings of the Royal Society B*, 273, 1715-1727. <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspb.2006.3530>
- Boccolini, M., Cazorla, C. R., Galantini, J. A., Belluccini, P. A., & Baigorria, T. (2019). Cultivos de cobertura disminuyen el impacto ambiental mejorando propiedades biológicas del suelo y el rendimiento de los cultivos. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 45(3), 412-425. https://www.researchgate.net/publication/344239096_Cultivos_de_cobertura_disminuyen_el_impacto_ambiental_mejorando_propiedades_biologicas_del_suelo_y_el_rendimiento_de_los_cultivos

- Camelo Banchemo, L., & Leiva Sanchez, P. (2022). *Efecto de los cultivos de cobertura sobre la recarga de agua, nitrógeno en el suelo y la productividad del maíz* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Correcciones bibliográficas de Trabajos finales de grado.
<http://tesis.fagro.edu.uy/index.php/tg/catalog/download/56/40/1104?inline=1>
- Carámbula, M. (2002). *Pasturas y forrajes: Vol. 1. Potenciales y alternativas para producir forraje*. Hemisferio Sur.
- Carámbula, M., Ayala, W., Bermúdez, R., & Carriquiry, E. (1996). *Verdeos de invierno asociados*. INIA. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2758/1/111219240807160214.pdf>
- Carciochi, W., Cafaro, F., Crespo, C., Dominguez, G., Rodriguez, M. P., Reussi, N. I., Wyngaard, N., Sainz, H. R., Studdert, G. A., & Barbieri, P. (2023). Analysis of factors controlling maize yield response to hairy vetch and to nitrogen fertilization after hairy vetch. *Field Crops Research*, 303, Artículo e109138.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109138>
- Carini, G. (2024, 18 de marzo). Cultivos de servicio: Un puente para la rentabilidad sostenible. *La Nación*. <https://www.lanacion.com.ar/economia/campo/cultivo-de-servicio-un-puente-para-la-rentabilidad-sustentable-nid18032024/>
- Clark, A. (Ed.). (2007). *Managing cover crops profitably* (3rd ed.). Sustainable Agriculture Research and Education. <https://www.sare.org/wp-content/uploads/Managing-Cover-Crops-Profitably.pdf>
- Clark, A. J., Decker, A. M., & Meisinger, J. J. (1994). Seeding rate and kill date effects on hairy vetch–cereal rye cover crop mixtures for corn production. *Agronomy Journal*, 86(6), 1065-1070.
<https://doi.org/10.2134/agronj1994.00021962008600060025x>
- Corbeels, M., Hofman, G., & Van Cleemput, O. (1999). Simulation of net N immobilization and mineralization in substrate-amended soils by the NCSOIL computer model. *Biology and Fertility of Soil*, 28, 422-430.
<https://doi.org/10.1007/s003740050515>
- Cordeiro, C. F. dos S. Rodrigues, D. R., & Echer, F. R. (2022). Cover crops and controlled-release urea decrease need for mineral nitrogen fertilizer for cotton in sandy soil. *Field Crops Research*, 276, Artículo e108387.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108387>
- Crozier, C. R., King, L. D., & Hoyt, G. D. (1994). Tracing nitrogen movement in corn production systems in the North Carolina Piedmont: Analysis of nitrogen pool size. *Agronomy Journal*, 86(4), 642-649.
<https://doi.org/10.2134/agronj1994.00021962008600040011x>
- Decreto Ley n° 15.239: *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/15239-1981/3>

- Diaz Rossello, R. (1992). Evolución del nitrógeno total en rotaciones con pasturas. *Revista INIA de Investigaciones Agropecuarias*, 1(1), 27-35.
<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/8835/1/15630031207141001.pdf>
- Drinkwater, L. E., & Snapp, S. S. (s.f.). *Nutrients in agroecosystems: Rethinking the management paradigm*. eCommons.
<https://ecommons.cornell.edu/server/api/core/bitstreams/52c52881-53a3-411b-a335-60b55e77e0af/content>
- Ernst, O., Kemanian, A., Mazzilli, S., Cadenazzi, M., & Dogliotti, S. (2016). Depressed attainable wheat yields under continuous annual no-till agriculture suggest declining soil productivity. *Field Crops Research*, 186, 107-116.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378429015300885>
- Farías, E. (2020). *Cultivo de Cobertura: Una alternativa de manejo sustentable, apuntando a la rentabilidad* [Trabajo final de grado, Universidad Empresarial Siglo 21]. Repositorio Institucional de la Universidad Siglo 21.
<https://repositorio.21.edu.ar/handle/ues21/21106>
- Fassana, C. N., Hoffman, E. M., Berger, A., & Ernst, O. (2022). Nitrogen nutrition index at GS 3.3 is an effective tool to adjust nitrogen required to reach attainable wheat yield. *Agrociencia Uruguay*, 26(2), Artículo e924.
<https://doi.org/10.31285/AGRO.26.924>
- Finney, D. M., Buyer, J. S., & Kaye, J. P. (2017). Living cover crops have immediate impacts on soil microbial community structure and function. *Journal of Soil and Water Conservation*, 72(4), 361-373.
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.2489/jswc.72.4.361>
- Finney, D. M., White, C. M., & Kaye, J. P. (2016). Biomass production and carbon/nitrogen ratio influence ecosystem services from cover crop mixtures. *Agronomy Journal*, 108(1), 39-52.
<https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2134/agronj15.0182>
- García, J. A., Rebuffo, M., & Formoso, F. (1991). *Las forrajeras de La Estanzuela*. INIA. https://www.researchgate.net/publication/336776648_Las_forrajeras_de_La_Estanzuela
- Gilsanz, J. C. (2008). *Jornada de abonos verdes: Jardín de abonos verdes de invierno: Día de campo*. INIA. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/537/1/18429261108095122.pdf>
- Herridge, D. F., Peoples, M. B., & Boddey, R. M. (2008). Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. *Plant and Soil*, 311(1-2), 1-18.
<https://doi.org/10.1007/s11104-008-9668-3>
- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. (s.f.). *Banco de datos agroclimáticos*.
<https://www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>
- Instituto Uruguayo de Meteorología. (s.f.). *Tablas estadísticas*.
<https://www.inumet.gub.uy/clima/estadisticas-climatologicas/tablas-estadisticas>

- Justes, E., Mary, B., Meynard, J. M., Machet, J. M., & Thelier-Huché, L. (1994). Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Annals of Botany*, 74(4), 397-407. <https://doi.org/10.1006/anbo.1994.1133>
- Kaspary, T. E., García, M. A., Jorajuría, P., & Cabrera, M. (2020). Uso de avena negra y el rolado en el manejo de malezas. *Revista INIA*, (61), 47-51. https://www.researchgate.net/publication/342599288_USO_DE_AVENA_NEGRA_Y_ROLADOEN_EL_MANEJO_DE_MALEZAS
- Kaye, J. P., & Quemada, M. (2017). Using cover crops to mitigate and adapt to climate change: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(4), Artículo e4. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13593-016-0410-x>
- Ladha, J. K., Pathak, H., Krupnik, T. J., Six, J., & Van-Kessel, C. (2005). Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: Retrospects and prospects. *Advances in Agronomy*, 87, 85-156. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)87003-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)87003-8)
- 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>
- Malpassi, R. N., Kaspar, T. C., Parkin, T. B., Cambardella, C. A., & Nubel, N. A. (2000). Oat and rye root decomposition effects on nitrogen mineralization. *Soil Science Society of America Journal*, 64(1), 208-215. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.641208x>
- Miguez, F. E., & Bollero, G. A. (2018). Review of corn yield response under winter cover cropping systems using meta-analytical methods. *Crop Science*, 45(6), 2318-2329. <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.0014>
- Ordóñez-Fernández, R., Repullo-Ruibérriz de Torres, M. A., Márquez-García, J., Moreno-García, M., & Carbonell-Bojollo, R. M. (2018). Legumes used as cover crops to reduce fertilization problems improving soil nitrate in an organic orchard. *European Journal of Agronomy*, 95, 1-13. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S116103011830039X>
- Paredes, M. C. (2013). *Fijación biológica de nitrógeno en leguminosas y gramíneas* [Trabajo final de grado]. Universidad Católica Argentina.
- Peoples, M. B., Brockwell, J., Herridge, D. F., Rochester, I. J., Alves, B. J. R., Urquiaga, S., Boddey, R. M., Dakora, D. F., Bhattarai, S., Maskey, S. L., Sampet, C., Rerkasem, B., Khan, D. F., Hauggaard-Nielsen, H., & Jensen, E. S. (2009). The contributions of nitrogen-fixing crop legumes to the productivity of agricultural systems. *Symbiosis*, 48, 1-17. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03179980>

- Philippot, L., & Germon, J. C. (2005). Contribution of bacteria to initial input and cycling of nitrogen in soils. En F. Buscot & A. Varma (Eds.), *Microorganisms in soils: Roles in genesis and functions* (pp. 159-176). Springer.
https://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-26609-7_8
- Pinto, P. (2018). *Evaluación de la fijación biológica de nitrógeno y la producción de raíces en distintos cultivos de servicios y sus efectos sobre las reservas de C y N orgánico del suelo* [Disertación doctoral, Universidad de Buenos Aires]. Repositorio Institucional CONICET Digital.
<https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/147928>
- Piñero, G. (2018). *Cultivos de servicio en sistemas agrícolas*. Acopiadores.
<http://www.acopiadores.com/sites/default/files/videos/-41394-GERVASIO%20PIÑERO-A%20TODO%20TRIGO%202018.pdf>
- Renzi, J. P., & Cantamutto, M. A. (2007, 3-5 de octubre). *Efecto de la densidad de siembra sobre la producción de forraje de Vicia sativa L. y Vicia villosa Roth consociada con Avena sativa L.* [Contribución]. 30 Congreso Argentino de Producción Animal, AAPA, Santiago del Estero, Argentina.
https://www.researchgate.net/publication/303868393_Efecto_de_la_densidad_de_siembra_sobre_la_produccion_de_forraje_de_Vicia_sativa_L_y_Vicia_villosa_Roth_consociada_con_Avena_sativa_L
- Ross, S. M., King, J. R., Williams, C. M., Strydhorst, S. M., Olson, M. A., Hoy, C. F., & Lopetinsky, K. J. (2015). The effects of three pulse crops on a second subsequent crop. *Canadian Journal of Plant Science*, 95(4), 779-786.
<https://cdnsiencepub.com/doi/10.4141/cjps-2014-224>
- Sainju, U. M., & Singh, B. P. (2001). Tillage, cover crop, and kill-planting date effects on corn yield and soil nitrogen. *Agronomy Journal*, 93(4), 878-886.
https://www.researchgate.net/publication/235764912_Tillage_Cover_Crop_and_Kill-Planting_Date_Effects_on_Corn_Yield_and_Soil_Nitrogen
- Sainju, U. M., Singh, B. P., Whitehead, W. F., & Wang, S. (2007). Accumulation and crop uptake of soil mineral nitrogen as influenced by tillage, cover crops, and nitrogen fertilization. *Agronomy Journal*, 99(3), 682-691.
<https://doi.org/10.2134/agronj2006.0177>
- Sawyer, C. N., & McCarty, P. L. (1978). *Chemistry for environmental engineering* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Siri-Prieto, G., & Ernst, O. (2011). Raigrás como cultivo de cobertura: Efecto del largo del período de barbecho sobre la disponibilidad de agua, el riesgo de erosión y el rendimiento de la soja. *Cangüé*, (31), 18-27.
<https://www.unicampo.com.uy/img/raigras.pdf>
- Stute, J. K., & Posner, J. N. (1995). Synchrony between legume nitrogen release and corn demand in the upper Midwest. *Agronomy Journal*, 87(6), 1063-1069.
<https://doi.org/10.2134/agronj1995.00021962008700060006x>

- Teasdale, J. R. (1996). Contribution of cover crops to weed management in sustainable agricultural systems. *Journal of Production Agriculture*, 9(4), 475-479. <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/jpa1996.0475>
- Thorup-Kristensen, K. (1994). The effect of nitrogen catch crop species on the nitrogen nutrition of succeeding crops. *Fertilizer Research*, 37, 227-234. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00748941>
- Thorup-Kristensen, K., Magid, J., & Jensen, L. S. (2003). Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. *Advances in Agronomy*, 79, 227-302. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(02\)79005-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(02)79005-6)
- Unkovich, M., Herridge, D., Peoples, M., Cadisch, G., Boddey, B., Giller, K., Alves, B., & Chalk, P. (2008). *Measuring and modeling biological nitrogen fixation in agriculture*. Australian Centre for International Agricultural Research. https://www.aciar.gov.au/sites/default/files/legacy/node/10169/mn136_measuring_plant_associated_nitrogen_fixation_19979.pdf
- Vitousek, P. M., Aber, J. D., Howarth, R. W., Likens, G. E., Matson, P. A., Schindler, D. W., Schlesinger, W. H., & Tilman, D. G. (1997). Human alteration of the global nitrogen cycle: Sources and consequences. *Ecological Applications*, 7(3), 737-750. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1997\)007\[0737:HAOTGN\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1997)007[0737:HAOTGN]2.0.CO;2)
- Vitousek, P. M., & Matson, P. A. (1985). Disturbance, nitrogen availability, and nitrogen losses in an intensively managed loblolly pine plantation. *Ecology*, 66(4), 1360-1376. <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2307/1939189>
- Wagger, M., Cabrera, M., & Ranells, N. (1998). Nitrogen and carbon cycling in relation to cover crop residue quality. *Journal of Soil and Water Conservation*, 53(3), 214-218. <https://www.proquest.com/openview/cba021f344a52bdbc16078e402881e4e/1?cbl=48602&pq-origsite=gscholar>