

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

**EVALUACIÓN DEL USO DE CULTIVO DE COBERTURA - LABOREO
REDUCIDO Y MULCHING CON MANEJO ORGÁNICO SOBRE EL
RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE CALABACÍN Y LA CALIDAD DEL
SUELO**

por

Camila DO CANTO RODRÍGUEZ
Ana Laura RIVERO SUÁREZ

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

**MONTEVIDEO
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. (Dra.) Mariana Scarlato García

Ing. Agr. (Dra.) Florencia Alliaume Molfino

Lic. Biol. (Dra.) Gabriela Illarze

Tribunal:

Ing. Agr. (Dra.) Fernanda Záccari

Lic. Bioq. (Dra.) Natalia Bajsa

Ing. Agr. (Dra.) Mariana Scarlato

Fecha: 16 de diciembre de 2025

Estudiante:

Camila Do Canto Rodríguez

Ana Laura Rivero Suárez

AGRADECIMIENTOS

De mi parte, Camila: Quisiera hacer un especial agradecimiento a mi compañera de tesis, quien se convirtió en una amiga muy querida y especial para mí, gracias por ser mi mejor equipo sin vos nada hubiese sido tan especial. También a mi familia, por ser el pilar fundamental que me sostuvo durante todo este proceso, por su amor incondicional, su paciencia y por creer en mí incluso cuando yo dudaba. A mis amigos, a lo que están desde siempre a los que la FAgro me regalo, un millón de gracias por acompañarme, escuchar y abrazarme siempre cuando lo necesite son la familia que elegí. A mi pareja, Adrian gracias a ti por ser mi cable a tierra, por motivarme y recordarme en los momentos difíciles que sí se podía, que todo esfuerzo valía la pena. Agradecer a aquellos que ya no están conmigo, pero me apoyaron, me alentaron y creyeron en mí. Vô y abuela con enorme gratitud y cariño, les dedico también este logro. También agradezco a dios por haberme permitido disfrutar de este hermoso proceso.

De mi parte, Ana Laura: gracias a mis padres, Heber y Niria, pilares fundamentales de mi existir. A mi Titi y mi tía Adri, por acompañarme y apoyarme desde que nací. A mi tía Tere, y mis primas Rosi y Anita, por los fines de semana en familia que me regalaron estando lejos de casa. A toda mi familia, a mis amigos de infancia y a los amigos del camino que he transitado hasta aquí: gracias por ser maestros de la vida. A mi compañero Ernesto, gracias por ser sostén, por tu paciencia y por caminar a mi lado en este último tramo. A Camí, gracias por enseñarme sobre trabajo en equipo, complementariedad y empatía. A los amigos que me regaló la casa de estudio, y a la AeA, por ser espacio de reivindicación, de aprendizajes, de familia. A Gustavo Marisqueira, quién me ha apoyado y orientado desde que ingrese a la carrera. A mis compañeros y docentes de la Universidad Mayor de San Simón, a mis compañeros de pasantía en el Parque Tecnológico Industrial del Cerro. A todas las personas que han sido parte del camino: gracias. Cada vínculo fue semilla, raíz o rama de este recorrido. Si hoy llego a destino, es porque muchas manos y corazones me acompañaron a crecer. Un agradecimiento especial a nuestras tutoras Mariana, Gabriela y Florencia, por su dedicación, paciencia y el conocimiento que nos brindaron en este proceso. A Pablo González por el soporte estadístico que nos brindó. A los funcionarios del CRS, en especial a Nati, Néstor y Quito, por el apoyo durante toda la etapa de campo. A los compañeros del laboratorio de Microbiología y a los del laboratorio de Suelos, especialmente a Marcelo, Carlitos, Melany y Leti, por su ayuda en las actividades de laboratorio. A Fernanda Zaccari, por brindarnos generosamente material de zapallo calabacín y por su disposición para orientarnos y aclarar nuestras consultas. El más sincero agradecimiento al equipo de Biblioteca de Facultad de Agronomía, en especial a Sully por siempre estar dispuesta y atenta a todas nuestras solicitudes. Finalmente, gracias a la Universidad de la República, pública, laica y gratuita.

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	3
AGRADECIMIENTOS	4
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	7
RESUMEN.....	8
SUMMARY	9
1. INTRODUCCIÓN	10
1.1 Objetivos	11
2. RIVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1 Horticultura en el Uruguay	12
2.2 Manejo y estado del suelo bajo horticultura en el Uruguay	13
2.3 Tecnología adaptada para el manejo de suelo en la horticultura y sus limitantes	14
2.3.1 Cultivo de cobertura	15
2.3.2 Laboreo reducido.....	16
2.3.3 Mulching	17
2.3.4 Limitantes en la aplicación de las tecnologías de LR y CC en Uruguay.....	18
2.4 Importancia del nitrógeno en el suelo y su dinámica bajo CC-LR	20
2.4.1 El ciclo de nitrógeno en los agroecosistemas.....	20
2.4.2 Efecto de CC-LR sobre la descomposición microbiana y la disponibilidad de N	21
2.5 Morfología y ecofisiología de calabacín y producción en Uruguay	22
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
3.1 Ubicación del experimento	24
3.2 Caracterización del suelo y antecedentes de uso del área	24
3.3 Tratamiento y diseño experimental.....	25
3.4 Preparación del suelo.....	26
3.5. Manejo y desarrollo del cultivo de cobertura, y evolución de la cobertura durante el experimento.....	26
3.6 Manejo del cultivo comercial.....	30
3.7 Determinaciones.....	31
3.7.1 Suelo	31
3.7.1.1 Determinaciones físicas	31

3.7.1.2 Determinaciones químicas	31
3.7.1.3 Determinaciones microbiológicas	32
3.7.2 Cultivo comercial de calabacín	33
3.7.2.1 Evaluación del crecimiento y desarrollo	33
3.7.2.2 Rendimiento y calidad	34
3.8 Análisis estadístico	35
4. RESULTADOS	37
4.1 Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo	37
4.1.1 Propiedades físicas del suelo y contenido de humedad	37
4.1.2 Propiedades químicas del suelo.....	37
4.1.3 Propiedades biológicas del suelo	39
4.2 Crecimiento y desarrollo, rendimiento y componentes del rendimiento del cultivo de calabacín	41
4.2.1 Crecimiento y desarrollo del cultivo de calabacín	41
4.2.2 Rendimientos y componentes del rendimiento del cultivo de calabacín.....	42
5. DISCUSIÓN.....	45
5.1 Propiedades del suelo	45
5.1.1 Parámetros físicos y contenido de humedad	45
5.1.2 Parámetros químicos y biológicos.....	46
5.2 Rendimiento del cultivo de calabacín	49
5.2.2 Componentes del rendimiento.....	50
5.2.3 Rendimiento Total.....	51
6. CONCLUSIONES	52
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55
8. ANEXOS.....	64

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla n.

<i>Tabla 1 Datos analíticos del horizonte superficial del suelo utilizado en el cuadro hortícola</i>	24
<i>Tabla 2 Caracterización del compost (expresado en base seca).....</i>	26
<i>Tabla 3 Biomasa total y por especie al acamado del cultivo de cobertura</i>	27
<i>Tabla 4 Porcentaje de suelo desnudo y cobertura total, desglosado por tipo, 25 días antes del acamado</i>	28
<i>Tabla 5 Porcentaje de suelo desnudo y cobertura desglosado por tipo, al 22/11/23.....</i>	29
<i>Tabla 6 Porcentaje de suelo desnudo y cobertura desglosado por tipo, al 19/01/24.....</i>	29
<i>Tabla 7 Crecimiento y desarrollo del calabacín a los 43 y 57 días post trasplante (dpt)</i>	42
<i>Tabla 8 Rendimiento comercial y total de calabacín, proporción de descarte y frutos verdes</i>	43
<i>Tabla 9 Componentes del rendimiento total del cultivo de calabacín.....</i>	44

Figura n.

<i>Figura 1 Esquema del ensayo y distribución de los tratamientos</i>	25
<i>Figura 2 Secuencias de laboreo, preparación del suelo para la siembra del CC</i>	26
<i>Figura 3 Evolución y manejo del acamado del CC</i>	27
<i>Figura 4 Evaluación de cobertura de suelo.....</i>	30
<i>Figura 5 Componentes del rendimiento del cultivo de calabacín</i>	35
<i>Figura 6 Nitrógeno mineral ($NH_4^+ + NO_3^-$) en calabacín en tres momentos del ciclo.....</i>	38
<i>Figura 7 Contenido de amonio y nitrato en suelo en tres momentos del ciclo de calabacín</i>	39
<i>Figura 8 Respiración basal del suelo durante el cultivo de cobertura, posttrasplante y cosecha de calabacín</i>	40
<i>Figura 9 Potencial de mineralización del nitrógeno durante el CC, post trasplante y cosecha de calabacín</i>	40
<i>Figura 10 Potencial de nitrificación durante el cultivo de cobertura, post trasplante y cosecha de calabacín</i>	41

RESUMEN

La rotación de cultivos hortícolas con cultivos de cobertura y el laboreo reducido (CC-LR) es estratégica en sistemas agroecológicos, pero existen limitantes para su adopción debido, entre otros factores, a resultados erráticos y muchas veces bajos rendimientos. Este estudio tuvo como objetivo contribuir al desarrollo y validación de esta tecnología en un sistema agroecológico, analizando su impacto sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, así como sobre el rendimiento del cultivo de zapallo calabacín (*Cucurbita moschata Duch*). El experimento se ubicó en el Centro Regional Sur de la Facultad de Agronomía, Uruguay. Se testeó el CC-LR con dos densidades de siembra de CC (D1 y D2), agregado de mulch extra (D2+M), y suelo desnudo (SD). En cuanto a las propiedades físicas, la densidad aparente y la resistencia a la penetración se mantuvieron por debajo de los valores críticos para el crecimiento radicular en todos los tratamientos, lo que evidencia condiciones favorables para la exploración de raíces y una adecuada aireación del perfil del suelo. Las propiedades químicas y biológicas del suelo mostraron una dinámica influenciada por la calidad del residuo del CC y las condiciones ambientales. Durante el invierno se registraron altos valores de respiración basal (RB) y potencial de mineralización de nitrógeno (PMN); en primavera, un pico de N mineral - principalmente amonio- asociado a la rápida descomposición del lupino; y en verano, pese a las altas temperaturas, los tratamientos con mayor cobertura mantuvieron una mayor actividad microbiana global, evidenciando que mantener el suelo cubierto favorece la salud biológica del sistema. Se lograron rendimientos entre 45 y 49 Mg/ha. Si bien el rendimiento total del cultivo no tuvo diferencias entre tratamientos, existieron diferencias en sus componentes (peso y número de frutos), que evidencian diferencias en el funcionamiento sistémico del cultivo. Los resultados posicionan al CC-LR y mulching como tecnologías promisorias para la transición agroecológica, demostrando que es posible sostener altos rendimientos y mejorar la calidad del suelo sin recurrir a insumos externos, contribuyendo al desarrollo de sistemas hortícolas más sostenibles.

Palabras clave: sustentabilidad, manejo de suelos, horticultura, producción orgánica, manejo conservacionista de suelo

SUMMARY

The rotation of horticultural crops with cover crops and reduced tillage (CC-RT) is a strategic practice in agroecological systems, but its adoption is limited due to, among other factors, inconsistent results and often low yields. This study aimed to contribute to the development and validation of this technology in an agroecological system by analyzing its impact on the physical, chemical, and biological properties of the soil, as well as on the yield of zucchini squash (*Cucurbita moschata Duch.*). The experiment was conducted at the Centro Regional Sur of the Faculty of Agronomy, Uruguay. The CC-RT system was tested using two cover crop seeding densities (D1 and D2), additional mulch (D2+M), and bare soil (BS). Regarding physical properties, bulk density and penetration resistance remained below critical thresholds for root growth across all treatments, indicating favorable conditions for root exploration and adequate aeration of the soil profile. Soil chemical and biological properties showed a dynamic response influenced by the quality of cover crop residues and environmental conditions. During winter, high basal respiration (BR) and nitrogen mineralization potential (NMP) were recorded; in spring, a peak of mineral N—mainly ammonium—was associated with the rapid decomposition of lupine residues; and in summer, despite high temperatures, treatments with greater surface cover maintained higher overall microbial activity, demonstrating that maintaining soil cover enhances the biological health of the system. Yields ranged from 45 to 49 Mg/ha. Although total yield did not differ among treatments, differences in yield components (fruit number and weight) were observed, indicating variations in the systemic functioning of the crop. The results position CC-RT and mulching as promising technologies for agroecological transition, demonstrating that it is possible to sustain high yields and improve soil quality without relying on external inputs, thereby contributing to the development of more sustainable horticultural systems.

Keywords: sustainability, soil management, horticulture, organic production, conservation soil management

1. INTRODUCCIÓN

La horticultura nacional constituye una actividad estratégica para la producción de alimentos frescos en Uruguay, desempeñando un rol clave tanto en términos económicos como sociales. A pesar de su relevancia, el sector enfrenta múltiples desafíos vinculados a la sostenibilidad de los sistemas productivos, entre los cuales se destacan la degradación de los suelos y la disminución de explotaciones familiares. La horticultura ocupa el 2,5 % de la superficie agropecuaria del país (13400 ha), con aproximadamente 2500 productores/as, incluyendo la producción de papa (Oficina de Estadísticas Agropecuarias [DIEA], 2023), los cuales se dedican a la producción hortícola, suministrando alimentos frescos destinados casi en su totalidad para el mercado interno (Colnago et al., 2023). La producción hortícola se radica principalmente en la zona sur (Montevideo, Canelones, sur de San José y sur de Florida) y zona norte (mayormente Salto y Artigas).

En las últimas décadas, la horticultura en Uruguay ha enfrentado importantes transformaciones y desafíos, asociados a un contexto socioeconómico desfavorable que ha impactado significativamente al sector. A partir de los años 70, la caída de los precios de los productos impulsó un proceso de tecnificación y especialización, que provocó un numeroso desplazamiento de pequeños productores (Aldabe Dini, 2000). Esta presión económica acentuada por el aumento de los costos de energía y agroquímicos afectó los ingresos de las familias productoras que, junto con otros procesos socioculturales, llevó a una reducción generalizada de números de explotaciones familiares. Entre 2000 y 2011, el número total de explotaciones familiares disminuyó un 22 %, mientras que en el sector hortícola la reducción fue aún más drástica, con una caída del 51 % (Colnago et al., 2023). La tendencia seguida por los productores que permanecieron fue hacia una intensificación productiva, basada en la especialización y aumento de la intensidad de uso de los recursos, riego y agroquímicos, que comprometen la sostenibilidad del sistema (Aguerre et al., 2014; García de Souza et al., 2011). Particularmente, aumentando, aún más, la presión sobre suelos ya deteriorados (Alliaume et al., 2013; Dogliotti et al., 2004).

Las causas del deterioro de la calidad del suelo en los sistemas hortícolas son multifactoriales; sin embargo, diversas prácticas comúnmente realizadas en los predios de producción podrían estar contribuyendo a este proceso. Entre ellas se encuentran la falta de planificación y sistematización de las chacras, numerosas intervenciones de laboreo al año, frecuentemente invirtiendo el perfil del suelo, además del prolongado tiempo en barbecho o suelo desnudo con ausencia de cultivo de cobertura, escasos aportes de materia orgánica (MO), y el elevado uso de agroquímicos (Alliaume et al., 2013; García de Souza et al., 2011). El manejo intensivo de la producción ha conducido a la pérdida de estructura y de carbono orgánico, limitando la actividad biológica y generando procesos de erosión y compactación, siendo la región hortícola donde se evidencia la mayor incidencia y severidad de erosión en el país (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca [MGAP], s.f.).

Ante esta situación, un estudio realizado en el país ha identificado prácticas agronómicas que contribuyen a reducir la erosión y la degradación del suelo en sistemas

hortícolas. Entre ellas se destacan la rotación de cultivos, la incorporación de abonos orgánicos, la mejora en la sistematización de la chacra, el uso de cultivos de cobertura (CC) asociado a estos el laboreo reducido (LR) (Alliaume et al., 2013).

La combinación de CC y LR se presenta como una estrategia prometedora para mitigar la erosión y la degradación del suelo, además de favorecer el incremento de materia orgánica, mejorar el ciclado de nutrientes, reducir las pérdidas de nitrógeno llevando a un aumento de la diversidad y la actividad microbiana. Esta tecnología resulta clave para el desarrollo de sistemas de producción más sostenibles (Dai et al., 2024; Scarlato et al., 2024; Zhang et al., 2020). Sin embargo, la implementación exitosa de la tecnología de CC-LR implica retos importantes para los productores, especialmente en sistemas orgánicos (Peigné et al., 2007; Scarlato et al., 2024), donde el control de malezas y la nutrición de cultivos son desafiantes al no emplearse herbicidas ni fertilizantes de síntesis, lo que exige un ajuste más preciso de las prácticas de manejo (Scarlato et al., 2024).

La presente investigación propuso contribuir al desarrollo de la tecnología CC-LR y uso de mulch orgánico en sistemas hortícolas de base orgánica-agroecológica, utilizando como modelo el cultivo de zapallo calabacín (*Cucurbita moschata*). Este cultivo, de baja exigencia en insumos y frecuente en predios familiares, representa una oportunidad para ensayar y escalar esta práctica sostenible. Se evaluaron dos densidades de siembra del CC, y el agregado de mulch orgánico en superficie, sobre parámetros de calidad del suelo y desempeño productivo del cultivo calabacín. El trabajo fue realizado en el marco del Proyecto “Efecto del manejo de la cobertura vegetal y modelación de la dinámica del agua en el suelo en cultivos hortícolas orgánicos con laboreo reducido” (CSIC-I+D, UdeLaR. 2023-2025). Los resultados obtenidos aportan evidencia científica y experiencia, contribuyendo a la adopción efectiva de estas prácticas en contextos productivos diversos, fortaleciendo el proceso de transición agroecológica en la horticultura nacional.

1.1 Objetivos

El objetivo general es contribuir al desarrollo de la tecnología de cultivo cobertura (CC)-laboreo reducido (LR), y el uso de mulch orgánico, en la producción hortícola con manejo orgánico-agroecológico.

Los objetivos específicos de esta tesis fueron evaluar el efecto de cuatro tratamientos de LR (CC con dos densidades de siembra-LR, CC-LR-agregado de mulch extra, y un testigo de suelo desnudo-LR) en una temporada de cultivo calabacín (*Cucurbita moschata*) con manejo agroecológico sobre:

- i. Propiedades fisicoquímicas del suelo.
- ii. Propiedades microbianas de salud del suelo y ciclo del nitrógeno.
- iii. Parámetros de crecimiento y desarrollo, rendimiento y la calidad del cultivo de calabacín.

2. RIVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo se articulan los principios conceptuales que estructuran y orientan el presente trabajo, considerando el estado actual de los suelos y el manejo que se realiza en las áreas de producción hortícola en Uruguay. En este contexto, se revisan alternativas tecnológicas promovidas para producción orgánica y agroecológica, como el laboreo reducido, los cultivos de cobertura y el uso de mulch orgánico, las cuales favorecen una producción ambientalmente sostenible, aportando a la conservación de los suelos y de la vida que éste sustenta. También se plantean los requerimientos ecofisiológicos del cultivo utilizado en el estudio, calabacín, lo cual determinó la estrategia de su manejo en el contexto de manejo de CC-LR y las determinaciones realizadas para evaluar su efecto.

2.1 Horticultura en el Uruguay

La horticultura en Uruguay se concentra principalmente en dos regiones, Litoral Norte (Salto y Artigas fundamentalmente) y Sur (Canelones, Montevideo, y San José), siendo la zona sur la que concentra el 80 % de las explotaciones hortícolas a nivel nacional. Actualmente, se estima que alrededor de 2.500 productores/as participan en la actividad, con un fuerte carácter familiar, ya que se estima que el 85 % de los predios son familiares (Ackermann & Díaz, 2016). Estos sistemas de producción ocupan un total de 13.400 ha (DIEA, 2023). Entre los principales cultivos a campo se destacan la papa, los zapallos, la cebolla, la zanahoria y el boniato, los cuales abarcan una proporción significativa de la superficie cultivada y se concentran mayormente en la región sur del país (DIEA, 2023). La producción anual estimada alcanza las 287.554 toneladas, de las cuales la mayor parte se destina al mercado interno, con Montevideo como principal centro de consumo (Colnago et al., 2023).

En las últimas décadas, la horticultura uruguaya ha experimentado un proceso de transformación significativo. Durante la segunda mitad del siglo XX, el sector se caracterizaba por una producción diversificada y de bajo nivel tecnológico. Sin embargo, el aumento de la demanda de alimentos y la necesidad de mejorar los ingresos de las familias productoras, en un contexto de industrialización de la agricultura, conllevó a un incremento del área cultivada y rendimientos en base a una intensificación del uso de insumos y la adopción de nuevas tecnologías (Aldabe Dini, 2000). Entre 1961 y 2000, la intensificación de los sistemas productivos, sumada a los bajos retornos económicos, provocó el abandono del rubro por parte del 50 % de los productores hortícolas en ese periodo (L. Aldabe Dini, comunicación personal, s.f.). Los que continuaron en la actividad se orientaron hacia una mayor especialización, con un aumento en el volumen producido y disminuyeron la diversidad de los cultivos. También, en las zonas hortícolas, el área destinada para las hortalizas por predio aumentó, mientras que la superficie total ocupada por estos predios se mantuvo estable. Este proceso permitió sostener los volúmenes de producción a partir de cambios en la estructura productiva y organizacional del sector (L. Aldabe Dini, comunicación personal, s.f.). La consolidación de este modelo productivo implicó avances tecnológicos en el sector como la incorporación de sistemas de riego eficientes, el uso de variedades hibridas y la adopción de prácticas de manejo

integrado de plagas. Sin embargo, también trajo consigo desafíos ambientales, ya que la incorporación de tecnologías más eficientes y el aumento en la productividad, con falencias en la planificación, produjo una creciente dependencia de insumos externos y de impactos negativos sobre los recursos naturales, expresados en el deterioro de la calidad del suelo y la presión sobre el recurso hídrico (Dogliotti et al., 2012).

Este cambio en la matriz productiva ha tenido importantes repercusiones socioeconómicas. Por un lado, la reducción en la diversidad de cultivos ha generado una mayor dependencia de insumos externos, elevando los costos de producción y afectando la competitividad de los productores familiares (Colnago et al., 2023). Sin embargo, este aumento en el rendimiento no logró sostenerse en el tiempo, y a pesar del elevado uso de agroquímicos, persisten brechas de rendimiento cercanas al 50 % en promedio (Scarlato et al., 2022). Esto podría estar explicado por factores de manejo como son fechas de siembra, el contenido de materia orgánica (MO) cada vez más bajo y la mayor frecuencia de cultivos en la rotación (Scarlato et al., 2020). Por tanto, estas transformaciones han subrayado la necesidad de promover modelos de producción más sostenibles, capaces de equilibrar los objetivos económicos, sociales y ambientales (Colnago et al., 2023).

2.2 Manejo y estado del suelo bajo horticultura en el Uruguay

El deterioro de la calidad del suelo y la disminución de la fertilidad causados por la agricultura son un problema a nivel global, que amenaza tanto la calidad del medio ambiente como la sostenibilidad de los medios de vida de los agricultores. Este es también el caso de los productores de hortalizas del sur de Uruguay, que tienden a especializarse e intensificar su producción para asegurar sus ingresos (Alliaume et al., 2014).

En Uruguay, y particularmente en las zonas donde se desarrolla la horticultura, se ha identificado que entre el 60 % y el 70 % de la superficie productiva presenta grados de erosión moderada a severa (MGAP, s.f.), como resultado de una larga trayectoria de producción agrícola intensiva (cereales, remolacha azucarera, paja de escoba, entre otros), basada en el laboreo convencional (LC), seguida por años de monocultivo hortícola que continúan hasta la actualidad (L. Aldabe Dini, comunicación personal, 2005).

La horticultura se ha desarrollado históricamente sobre la base de un uso intensivo del suelo, caracterizado por la realización de uno o más cultivos al año, escasa o nula rotación de especies, breves períodos de descanso entre cultivos, bajos aportes de materia orgánica y largos intervalos de suelo descubierto o con cobertura vegetal mínima. Este manejo, predominantemente basado en el LC tiene como finalidad el control de malezas y la preparación de camas de siembra adecuadas para el establecimiento rápido de los cultivos, e implica el uso repetido de herramientas que invierten el suelo y desestructuran los agregados, como arados de vertedera o de discos, excéntricas, disqueras, encanteradoras y rotovadores (Arboleya et al., 2010; Gilsanz, 2012; Gómez-Calderón et al., 2018). Como consecuencia de estas reiteradas intervenciones mecánicas, en conjunto con otras prácticas de manejo hortícola, se desencadena un proceso de degradación que genera erosión de suelo y reduce la concentración de materia orgánica en los primeros centímetros del perfil (García de Souza & Alliaume, 2010).

Una característica frecuente de los sistemas hortícolas intensivos es la escasa o nula incorporación de materia orgánica, lo que contribuye significativamente al deterioro del suelo. La materia orgánica cumple un rol fundamental en la estabilización de la estructura física del suelo, especialmente a través de su interacción con las partículas arcillosas. Su disminución genera una pérdida de estabilidad de los agregados, lo que facilita su desagregación frente a perturbaciones como el impacto de las gotas de lluvia o el tránsito de maquinaria. Como consecuencia, se producen efectos negativos como encostramiento superficial, compactación, pérdida de porosidad y reducción de la capacidad de retención de agua del perfil. Esta pérdida de estructura favorece el escurrimiento superficial del agua, que no logra infiltrarse, intensificando los procesos erosivos (Docampo, 2012; García de Souza & Alliaume, 2010). Como señalan García Préchac y Clérici (1996) el proceso de erosión consiste en “la desagregación del suelo por el golpeteo de la lluvia, el transporte del material desagregado por el escurrimiento superficial y la deposición cuando el escurrimiento pierde velocidad” (p. 149).

La problemática ha sido ampliamente estudiada y documentada por investigadores nacionales. Un ejemplo es el proyecto FPTA-209 continuado por el EULACIAS, desarrollados durante cinco años en 16 predios hortícolas del sur de Uruguay, donde se evaluaron 61 cuadros de cultivo: solo 3 presentaban un contenido de carbono cercano al nivel original (alrededor del 65 %), 9 se encontraban entre el 33 % y el 45 %, y los 49 restantes estaban por debajo del 33 % (Dogliotti et al., 2012).

El deterioro del suelo impacta directamente sobre la productividad y la sostenibilidad de los sistemas hortícolas, observándose un menor desarrollo y vigor de los cultivos, viéndose expuestos a deficiencias nutricionales, mayor susceptibilidad al ataque de plagas y enfermedades. Para mantener el nivel productivo se hace necesario un mayor uso de agroquímicos, lo que va en desmedro del medio ambiente, y consecuentemente en una pérdida en la sustentabilidad de la producción, conjuntamente con un incremento en los costos de producción (Gilsanz, 2012). En este sentido, trabajos de investigación nacional demuestran que el deterioro de la calidad del suelo es una de las causas de los bajos rendimientos, mayores costos de producción, una reducción del margen de ganancia y una menor productividad de la mano de obra (Alliaume et al., 2013, 2014; Colnago et al., 2023; Dogliotti et al., 2004).

2.3 Tecnología adaptada para el manejo de suelo en la horticultura y sus limitantes

Para revertir el deterioro del sistema productivo y mejorar la calidad del suelo, en Uruguay se ha avanzado en la investigación y el desarrollo de tecnologías de manejo sostenible de suelos. En el caso de los sistemas hortícolas, se han identificado diversas prácticas promisorias que contribuyen a mitigar la erosión y degradación del suelo. Entre ellas, destacan la rotación de cultivos con praderas cuando la superficie del predio lo permite, el uso de canteros con longitudes y pendientes adecuadas, la incorporación de estiércoles, compost, y abonos verdes, el mulching y algunas experiencias con mínimo laboreo o laboreo reducido (Angers et al., 1999; García de Souza et al., 2011).

Además de contribuir a frenar los procesos de degradación del suelo, estas prácticas pueden favorecer un mejor aprovechamiento del agua, al incrementar la infiltración y mejorar la porosidad del suelo, lo que incide positivamente en la eficiencia en el uso del recurso hídrico. En este sentido, el uso de abonos verdes o cultivos de cobertura (en la medida que quedan en superficie y no son incorporados) y el laboreo reducido se presentan como estrategias con potencial para fortalecer la sostenibilidad de la producción hortícola y contribuir a su viabilidad en el mediano y largo plazo (Gilsanz, 2012).

2.3.1 Cultivo de cobertura

Los abonos verdes, cultivos de servicio o cultivos de cobertura (CC) se caracterizan por ser especies herbáceas anuales que se introducen en las rotaciones de los cultivos comerciales con el propósito de mejorar las condiciones del agroecosistema. Brindan protección al suelo contra la erosión, mejoran el ciclado de los nutrientes y reducen la lixiviación, evitando así la contaminación de aguas subterráneas y superficiales (Alliaume et al., 2014; Bowman et al., 1998). En particular, la inclusión de leguminosas en los CC contribuye a aumentar la fijación biológica de nitrógeno, mejorando la fertilidad natural del suelo. Por otro lado, las gramíneas se destacan por su mayor aporte de carbono, favoreciendo la acumulación de materia orgánica y la estabilidad estructural del suelo (Bowman et al., 1998).

Los CC, a diferencia de los abonos verdes, no son incorporados sino mantenidos en cobertura, y a diferencia de los verdeos, no son cosechados ni pastoreados, sino que la mayor parte de su biomasa queda *in situ* (Gilsanz, 2012). Los CC permanecen en la superficie como residuo o mulch orgánico, donde cumplen un rol clave en la protección del suelo. Además, contribuyen a incrementar la disponibilidad hídrica para el cultivo comercial, regulan las oscilaciones térmicas del suelo y reducen la lixiviación de nitratos, disminuye la escorrentía y promueve el laboreo biológico y en la medida que su biomasa aérea y radicular se degrada, liberan nutrientes que enriquecen el suelo y favorecen su fertilidad (Alliaume et al., 2014; Frasier et al., 2016; Ponce et al., 2020; Restovich et al., 2012).

La elección del CC se basa en la necesidad del sistema productivo y los objetivos que se buscan alcanzar. Un aspecto clave para la selección de las especies es la relación C/N, que va a estar determinando la calidad y su impacto sobre el suelo, y condiciona las decisiones prácticas para su manejo efectivo (Frasier et al., 2016; Ponce et al., 2020; Restovich et al., 2012).

Entre las diversas especies de CC utilizadas en el país, se eligió para el ensayo el centeno y el lupino, debido a sus características agronómicas y su capacidad de mejorar los suelos. El centeno (*Secale cereale L.*), se caracteriza por ser una gramínea rústica que produce biomasa entre otoño y principios de la primavera, y tolera heladas y bajas temperaturas. Presenta un sistema radical extenso que le permite tener tolerancia a las sequías y prevenir la erosión hídrica, además de presentar efectos alelopáticos con potencial de control de las malezas. No tolera suelo anegados, pero presenta un buen

desarrollo en suelo húmedos, pero bien drenados, como los suelos del área experimental. Además, puede adaptarse a un amplio rango de suelos, con un buen desarrollo en aquellos de baja fertilidad. Es recomendado como abono verde en los suelos más pobres debido a que tiene una gran producción de biomasa y presenta una excelente sanidad (Carámbula, 2007). La siembra se realiza en abril-mayo, se adapta a la siembra al voleo. Para utilizarlo como CC en un sistema con LR, se corta o se arrasa en fase de grano lechoso (a los 120-140 días de siembra), momento en el que tiene menor potencial de rebrote (Gilsanz, 2012).

El lupino azul (*Lupinus angustifolius L.*), es una leguminosa con capacidad de fijación biológica de nitrógeno a través de rhizobium aportando alrededor de 90 kg N/ha. Por otra parte, presentan un sistema radical pivotante profundo, que mejora las propiedades físicas del suelo además de presentar gran capacidad de ciclado de nutrientes. Se adapta a amplios rangos de temperaturas, desde templadas a bajas (1 - 3 °C). Se adapta mejor a suelos arcillosos y con fertilidad media (Gilsanz, 2012).

2.3.2 Laboreo reducido

El laboreo reducido (LR) o también llamado conservacionista, busca disminuir las pérdidas de suelo y agua que ocurren normalmente en los sistemas convencionales mediante el mantenimiento de la cobertura del suelo y la reducción en la intensidad y/o frecuencia de laboreo mecánico. De acuerdo con Castro Luna y Esono Ndong (2001), es un sistema de cultivo que requiere mantener al menos un 30 % de la superficie del suelo cubierta por residuos del cultivo anterior, reduciendo los efectos de la erosión producidos por el agua.

En horticultura, el LR no implica la eliminación total del laboreo, sino su disminución en frecuencia e intensidad respecto al manejo convencional. En este sistema, se realiza una única intervención mecánica anual antes del establecimiento del CC, utilizando arado de cincel y encanteradora para formación de canteros. El arado de cincel permite trabajar el suelo a una profundidad de aproximadamente 20 cm, rasgando y descompactando sin invertir ni mezclar los horizontes, lo que ayuda a conservar la estructura edáfica y la estratificación natural. Posteriormente, se emplean encanteradoras de disco para conformar los canteros, lo que mejora el drenaje y favorece el desarrollo radical de los cultivos (Cerecetto et al., 2021).

Estudios realizados en Uruguay han demostrado que la implementación del LR contribuye a disminuir el riesgo de erosión, evidenciándose una tendencia hacia un mayor almacenamiento de carbono orgánico (Alliaume et al., 2014; Arboleya et al., 2012). Por otra parte, el LR también favorece el incremento del contenido de nitrógeno en el suelo. Al dejar mulch orgánico en superficie, se ha visto que reduce la evaporación e incrementa la infiltración (Alliaume et al., 2014), además de incrementar la respiración del suelo, la cual actúa como indicador de la actividad microbiana y un estimador del ciclo del carbono (Cerecetto et al., 2021; Scarlato et al., 2024). Al reducir las intervenciones sobre el suelo, la materia orgánica, que se concentra en los primeros centímetros, estimula la actividad

microbiana, promoviendo la formación de agregados que mejoran la estabilidad y la estructura del suelo (Peigné et al., 2007).

2.3.3 Mulching

Los mantillos, mulch o acolchados son una tecnología que se utiliza con frecuencia en la producción de hortalizas, se basa en cubrir la superficie evitando el suelo desnudo. El uso de mulch favorece la conservación de la humedad del suelo, ya que reduce las pérdidas de agua por evaporación. A su vez, modera las variaciones de la temperatura media y de la amplitud térmica del suelo, lo que depende tanto de la época del año como del material utilizado. Además, su aplicación contribuye a disminuir los procesos de erosión y resulta una herramienta eficaz en el control de las malezas (Duppong et al., 2004). El mulch puede estar compuesto por materiales orgánicos de origen vegetal o por láminas sintéticas de polietileno (Abdul-Baki & Teasdale, 2007; Allen et al., 1998; Duppong et al., 2004).

Si bien actualmente el mulch orgánico se considera una nueva tecnología, es una práctica muy antigua que consiste en cubrir el suelo con residuos orgánicos, proporcionando múltiples beneficios a las plantas, con un papel muy importante en la producción sostenible, e imprescindible en las zonas de producción áridas (Santos et al., 2025).

Para minimizar los efectos negativos del control químico y mantener las malezas bajo control, el mulch orgánico se presenta como una herramienta eficaz. Su acción como barrera física impide el paso de la luz, lo que limita el crecimiento de las malezas y reduce su germinación de manera significativa (Alptekin & Gürbüz, 2022). En un ensayo realizado en Chile con distintos residuos vegetales, se reportó una reducción mayor del 80 % de la biomasa de malezas bajo cobertura de vicia o caña en comparación con el tratamiento de suelo descubierto. Este efecto se le atribuye a la barrera física impuesta por el mulch como también posibles compuestos alelopáticos presentes en los residuos (Frutos et al., 2016).

En un estudio realizado en Paraná, Brasil, se evaluó el efecto del uso del mulching orgánico en comparación con un tratamiento de suelo desnudo. Durante el horario más caliente del día la temperatura máxima registrada para suelo desnudo fue de 42°C y para el suelo con mulch fue de 31°C, durante la noche las temperaturas mínimas registradas fueron de 24°C y para un suelo con mulch fueron de 26°C. Concluyeron que mantener el suelo cubierto con material orgánico mantiene la temperatura más estable y reduce los extremos, debido a que durante el día se redujo la absorción de la radiación por el suelo y durante la noche se redujo la pérdida de calor (Paulus et al., 2024).

En un ensayo realizado en La Plata (Argentina), que presenta condiciones climáticas similares al sur de Uruguay, se encontró que el uso de mulch orgánico en cultivo de arándanos permitió conservar la humedad, estabilizar temperatura, controlar malezas, y aumentar la actividad microbiana. Estos efectos se tradujeron en un incremento de los rendimientos de fruta entre un 30 % y un 48 % respecto al testigo,

resaltando el potencial del uso de coberturas como una estrategia sencilla y posiblemente efectiva para contribuir a la sustentabilidad productiva (Echever, 2023).

2.3.4 Limitantes en la aplicación de las tecnologías de LR y CC en Uruguay

Si bien la tecnología de CC y LR ofrece múltiples beneficios en términos de conservación y regeneración del suelo, como una reducción de la erosión, mayor actividad microbiana y una mejor retención de agua, entre otros, también se reconoce que su implementación requiere numerosos ajustes para minimizar los posibles efectos negativos sobre los resultados productivos. En este contexto, es fundamental contar con conocimientos técnicos y realizar adaptaciones en la gestión del predio para lograr una integración exitosa de estas prácticas.

El desarrollo de la tecnología de LR en la horticultura uruguaya se ha dado históricamente en sistemas con manejo convencional, caracterizados por una fuerte dependencia de fertilizantes sintéticos y agroquímicos para la nutrición del cultivo y el control de malezas (Scarlato et al., 2024). La trayectoria de trabajo en LR, iniciada a fines de los años 90 por medio del Programa de manejo de Recursos Naturales y desarrollo Rural (PRENADER), ha demostrado beneficios en términos de conservación del suelo, pero sin cuestionar el modelo de uso intensivo de insumos (Gilsanz & Arboleya, 2006). En este sentido, uno de los principales desafíos actuales es adaptar e implementar tecnologías como el LR en predios que, además de mejorar la salud del suelo, buscan reducir el uso de agroquímicos. Esto implica complejidades adicionales, especialmente en sistemas orgánicos, donde no se utilizan herbicidas ni fertilizantes sintéticos y donde, tradicionalmente, la terminación de los cultivos de cobertura y el control de malezas se realizan mediante laboreo mecánico. Este contexto de implementación de la tecnología obliga a replantear integralmente las estrategias de manejo y ha impulsado en los últimos años líneas de investigación orientadas a compatibilizar la práctica de CC-LR con sistemas de producción de bajo o nulo uso de agroquímicos (Peigné et al., 2007; Scarlato et al., 2024).

A pesar de que los CC generan un mulch vegetal que contribuye a la supresión de malezas, especialmente al inicio del ciclo productivo, su efectividad no se sostiene a lo largo de toda la temporada. Diversos estudios han demostrado que el control de malezas proporcionado por los CC disminuye progresivamente, resultando insuficiente para garantizar un manejo efectivo durante todo el cultivo (Carr et al., 2013). En concordancia, investigaciones realizadas por Scarlato et al. (2024), en condiciones comerciales y experimentales con manejo orgánico en Uruguay, evidenciaron que, aunque los CC lograron elevada biomasa y una adecuada cobertura del suelo, no fueron eficaces para reducir la presión de malezas durante el ciclo de la cebolla, lo que demandó una mayor carga de trabajo en el desmalezado en los sistemas con LR respecto a los de LC.

En sistemas con LR, el manejo de malezas presenta nuevos desafíos. Al no invertirse el suelo, las semillas presentes en capas profundas no se exponen a la luz ni a los cambios de temperatura, lo que reduce la germinación de especies anuales persistentes. Sin embargo, esta misma práctica puede favorecer a malezas perennes con

estructuras vegetativas subterráneas, como rizomas o raíces rastreras, ya que las herramientas utilizadas para preparar el suelo pueden fragmentarlas y dispersarlas, promoviendo su propagación y dificultando su control (Peigné et al., 2007).

Estudios nacionales han reportado que en sistemas con CC-LR puede observarse una mayor mortalidad de plantas del cultivo comercial al momento del trasplante, atribuida a dificultades para lograr una correcta implantación debido a la presencia de una capa gruesa de mulch, sin embargo, esta situación no es inherente al sistema, sino que responde a la necesidad de ajustar la técnica de trasplante, ya que asegurar que las plántulas queden bien asentadas requiere mayor precisión y tiempo, lo que puede representar un desafío adicional (Alliaume et al., 2014).

La implementación de estas tecnologías permitiría esperar un incremento de los rendimientos, asociado, entre otros factores, a una mayor retención de agua en el suelo. Sin embargo, resultados de investigaciones naciones en distintos cultivos hortícolas han mostrado rendimientos inferiores en comparación con los obtenido bajo LC (Alliaume et al., 2014; Arboleya et al., 2012). Esta reducción estuvo relacionada con el deficiente establecimiento de las plantas y/o deficiencia de N, debido a la inmovilización de N provocado por la descomposición del CC o la menor oxigenación del suelo respecto a un suelo laboreado (Alliaume et al., 2014; Scarlato et al., 2024). De este modo, los sistemas con CC-LR deben ser ajustados a las condiciones particulares de cada sitio, así lograr reducir la brecha de rendimiento en comparación con los sistemas con LC (Peigné et al., 2007).

La elección de las especies del CC es clave para optimizar el ciclado de nutrientes y mejorar la fertilidad del suelo. En un estudio realizado en el sur de Brasil, evaluaron el impacto de diferentes especies de CC (gramíneas, leguminosas y crucíferas), donde se las utilizó solas o en mezcla, sobre la dinámica del nitrógeno y el rendimiento del cultivo comercial. El estudio resalta que las gramíneas y las crucíferas se destacan por su capacidad de absorber y reciclar nitrógeno mineral del suelo, reduciendo así el riesgo de lixiviación. En cambio, las leguminosas contribuyen en la fijación biológica del nitrógeno (FBN), tanto de forma inmediata como con efectos residuales en el mediano plazo (Amado et al., 2002). La proporción de especies en la mezcla incide directamente en la dinámica del N: una alta participación de gramíneas eleva la relación carbono/nitrógeno (C/N) de la biomasa, lo que puede provocar inmovilización temporal del N disponible, ya que la comunidad microbiana lo utiliza para formar su propia biomasa, limitando su disponibilidad inmediata para los cultivos. En cambio, cuando los residuos presentan una menor relación C/N, como en el caso de las leguminosas, se favorece la mineralización y una liberación más rápida de nutrientes (Amado et al., 2002; Castellano-Hinojosa et al., 2021).

La dinámica del N también se ve fuertemente influenciada por el sistema de labranza. En sistemas con LR, la descomposición de la MO ocurre más lentamente debido a una menor perturbación del suelo, menor incorporación de residuos y condiciones menos favorables para la actividad microbiana (como menor temperatura y oxigenación

en la capa superficial). Esto puede generar una menor tasa de mineralización del N y, en algunos casos, una inmovilización neta del N durante el período de transición hacia prácticas de manejo que reducen la intensidad del laboreo, lo que limita su disponibilidad para los cultivos comerciales posteriores (Peigné et al., 2007).

Por otra parte, la velocidad de descomposición de los residuos y la consecuente liberación de N no depende solamente de la proporción de especies en la mezcla y su relación C/N, sino también del manejo y del momento del acamado. Estos factores determinan el estado de desarrollo y madurez del CC y por lo tanto, en la dinámica de mineralización o inmovilización del N (Peigné et al., 2007). Además, el tiempo que transcurre entre el acamado y el trasplante del cultivo comercial es importante, dependiendo del estado de madurez del CC y las necesidades del cultivo posterior. En este sentido, Amado et al. (2002), observa que la liberación de N de los residuos puede ocurrir luego de transcurrida las primeras semanas del manejo, generando una posible desincronización con la demanda inicial del cultivo comercial. Ensayos nacionales con CC-LR muestran resultados similares, reportando que la inmovilización microbiana puede limitar la disponibilidad de N y reducir los rendimientos, resaltando la importancia de un manejo adecuado de la relación C/N (Alliaume et al., 2014; Scarlato et al., 2024).

En este marco, resulta fundamental considerar la complejidad de seleccionar CC, que por un lado, se busca una relación C/N lo suficientemente baja como para evitar una marcada inmovilización de N, pero a su vez que mantenga sus residuos en el suelo el tiempo necesario para asegurar una protección frente a la erosión y al desarrollo de malezas. Siendo este equilibrio el desafío central para la sostenibilidad de los sistemas hortícolas (Peigné et al., 2007).

2.4 Importancia del nitrógeno en el suelo y su dinámica bajo CC-LR

2.4.1 El ciclo de nitrógeno en los agroecosistemas

El nitrógeno (N) es un nutriente esencial para los seres vivos, ya que es uno de los constituyentes principales de compuestos como aminoácidos, proteínas, enzimas, nucleoproteínas, ácidos nucleicos, así como también de las paredes celulares y clorofila en los vegetales (Perdomo & Barbazán, 2013).

En la naturaleza, el N se encuentra principalmente en dos grandes reservas: en la atmósfera, como N_2 , y en la materia orgánica del suelo (MOS). Aunque el N_2 representa cerca del 80 % del nitrógeno atmosférico, su uso está limitado por la estabilidad de su triple enlace, lo que lo hace biológicamente inerte salvo para ciertos microorganismos capaces de fijarlo (Tisdale et al., 1985).

En el suelo, más del 95 % del N total está en forma orgánica, asociada a proteínas, aminoácidos y otras estructuras complejas. Solo una pequeña fracción (alrededor del 2 %) se encuentra como N inorgánico, principalmente en forma de nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+), que son las formas asimilables por las plantas. También puede encontrarse nitrito (NO_2^-), aunque en cantidades muy pequeñas, excepto en casos donde se aplican fertilizantes amoniacales. Estas formas solubles son altamente móviles y transitorias, ya

que pueden ser absorbidas por las plantas, inmovilizadas por la microbiota edáfica o fácilmente lixiviadas con el agua de lluvia o de riego (Perdomo & Barbazán, 2013; Tisdale et al., 1985).

La mineralización e inmovilización del nitrógeno son procesos microbianos muy importantes en el ciclo del N. La mineralización es la transformación del N orgánico presente en la MOS a formas inorgánicas, como el amonio. Este proceso es llevado a cabo por microorganismos heterótrofos, los cuales obtienen su energía al descomponer compuestos orgánicos, liberando nutrientes durante el proceso. De forma simultánea ocurre el proceso de inmovilización, este consiste en la incorporación de N inorgánico (NH_4^+ o NO_3^-) a la biomasa microbiana, especialmente cuando los residuos orgánicos tienen una alta relación carbono/nitrógeno (C/N). Ambos procesos ocurren en paralelo y su balance dinámico es determinante para la disponibilidad de N mineral en el suelo (Castellano-Hinojosa et al., 2021; Cerón Rincón & Aristizábal Gutiérrez, 2012).

La cantidad de N que quede disponible para las plantas va a depender del método que se utilice para la incorporación del CC tras su terminación, el momento en el cual se realiza y las especies que se utilizaron en su composición. La tasa de descomposición de la biomasa del CC determina la velocidad de liberación del N al suelo (Castellano-Hinojosa et al., 2021).

2.4.2 Efecto de CC-LR sobre la descomposición microbiana y la disponibilidad de N

Las comunidades microbianas del suelo responden de forma rápida a los cambios del ambiente edáfico, por lo que su monitoreo permite detectar alteraciones tempranas en la calidad del suelo. Prácticas como el LR y el uso de CC alteran las condiciones físicas y la disponibilidad de residuos orgánicos, influyendo en los procesos de descomposición microbiana, por lo tanto, comprender estas interacciones resulta clave para evaluar el funcionamiento del ecosistema edáfico (Chavarría et al., 2016).

El LR, en combinación con CC, se ha asociado con una mayor acumulación de materia orgánica y una mayor actividad microbiana del suelo (Alliaume et al., 2017; Arboleya et al., 2012; Scarlato et al., 2024). Estas condiciones podrían favorecer un mayor potencial de mineralización de nitrógeno, aunque su expresión depende del sitio y el manejo.

Este mayor potencial de mineralización del nitrógeno está vinculado a la mayor disponibilidad de sustratos orgánicos y comunidades microbianas más activas. Sin embargo, este potencial no siempre se traduce en niveles más altos de N mineral disponible para los cultivos. Factores como la menor temperatura del suelo bajo coberturas vegetales, la aireación reducida o la calidad de los residuos (relación C/N) pueden reducir la velocidad de transformación del N orgánico a formas disponibles (Scarlato et al., 2024). En cambio, el LC, aunque presenta menor acumulación de MO, al aumentar la oxigenación, el disturbio del suelo puede favorecer una mineralización más rápida en ciertos momentos, y con ello el aumento de N mineral en el suelo. Este comportamiento dinámico y multifactorial del ciclo del N, plantea un desafío importante

para su manejo en sistemas hortícolas sustentables, y la necesidad de considerar el contexto edafoclimático y de manejo para ello (Angon et al., 2023; Scarlato et al., 2024).

En un estudio realizado en Argentina (Chavarría et al., 2016), donde se evaluó el efecto de los CC sobre la funcionalidad microbiana del suelo, se pudo observar aumentos significativos en la biomasa microbiana, la respiración basal y la actividad enzimática, en los tratamientos con mezcla de CC y sobre todo aquellos que incluían leguminosas en su mezcla, respecto al manejo testigo sin CC. Además del mayor tamaño y actividad de las comunidades microbianas también se pudo detectar una mayor diversidad, que podría implicar una mayor amplitud en el uso de sustratos. Estos resultados refuerzan el rol de los CC en el estímulo de las comunidades microbianas más activas y funcionales en el sistema de producción con LR.

2.5 Morfología y ecofisiología de calabacín y producción en Uruguay

El cultivo de zapallo calabacín (*Cucurbita moschata Duch*), es considerado un cultivo hortícola importante a nivel nacional, tanto en producción como en consumo de la población. Ocupa una superficie entre la producción de las zonas norte y sur de 810 hectáreas, las cuales nuclean aproximadamente 640 productores, y un volumen anual de producción de 9.988 Mg (DIEA, 2023).

Se caracteriza por ser una planta dicotiledónea, herbácea, anual-estival, perteneciente a la familia de las cucurbitáceas. Presenta raíces profundas y extensas, tallos largos y rastros, hojas grandes de forma acorazonada y rugosas, flores femeninas y masculinas (planta dioica), de color amarillo intenso, los frutos se clasifican como de tipo baya modificada (pepo), presentan cáscara dura de color anaranjado pálido y pulpa de color naranja intenso, rica en β-caroteno. Se desarrolla óptimamente en climas cálidos, en suelos fértilles y con buena disponibilidad de agua (Fornaris Rullán, 2012).

Para que se logre un correcto cuajado y desarrollo de los frutos, la polinización resulta fundamental. Este proceso depende de la presencia de flores pistiladas receptivas y de la transferencia de polen viable mediante un vector, generalmente insectos. Por ello, es importante asegurar condiciones de manejo y ambiente que permitan mantener una adecuada población de polinizadores al momento de la floración, ya que condiciones climáticas adversas o manejos como aplicaciones químicas que limiten el vuelo o actividad de los mismos, pueden provocar una disminución en el rendimiento (De Souza et al., 2017; Della Gaspera & Rodríguez, 2013).

Cucurbita moschata Duch es una especie ampliamente adaptada a diversas condiciones ambientales de América latina, al ser una planta estival por lo general se cultiva en climas cálidos, con alta humedad, y alta luminosidad (Della Gaspera & Rodríguez, 2013). La temperatura es un factor climático importante que determina su crecimiento y desarrollo, es una especie adaptada a zonas calientes con una temperatura entre 18 a 30°C, y no tolerando temperaturas inferiores a las 10°C, siendo su temperatura optimas entre 25 y 28 (Ramos et al., 2010).

La siembra puede realizarse directamente en campo o, para adelantar la cosecha, mediante almácigos, sembrados 2 o 3 semanas antes del trasplante. Los plantines se trasplantan al campo con terrón debido a limitantes en la regeneración de raíces. La época recomendada es a partir de octubre, a partir de que ya no existen riesgos de heladas (Aldabe Dini, 2000). Para la germinación de la semilla, se requiere de una temperatura de suelo entre 10°C a 35°C, dentro de este rango cuanto más elevada es la temperatura más rápido y uniforme germina (Ramos et al., 2010).

De acuerdo con estudios de Zinati et al. (2019), la densidad de siembra que podría utilizarse en zapallo calabacín es de 60 cm entre plantas y 1.5 m entre hileras, lo que equivale aproximadamente a 11 000 plantas por ha. El largo del ciclo del zapallo calabacín suele ser de 3 a 4 meses, siendo muy flexible según la fecha de plantación y expectativa del período de cosecha. En un ciclo de 3 meses, se obtienen 3 a 4 frutos por planta, traduciéndose en un rendimiento de 20 a 30 Mg/ha. De siembra a cosecha transcurren unos 100 a 120 días, y con sistema de almácigo, de trasplante a cosecha hay unos 70 a 90 días. Es fundamental considerar las condiciones climáticas antes y después de la cosecha, ya que influyen en la maduración y el correcto curado del fruto, siendo las condiciones óptimas de curado temperaturas de 25-30°C y HR 85 % (Aldabe Dini, 2000).

En un estudio realizado por Ponce et al. (2020), llevado a cabo en la región semiárida pampeana sobre un suelo franco arenoso con bajo contenido de materia orgánica (1 %), se evaluaron durante tres temporadas consecutivas seis tratamientos de manejo para el cultivo de zapallo calabacín. Estos tratamientos se diferenciaron por el uso o no de CC como antecesor (centeno y centeno-vicia) y por el método de terminación del CC (herbicida o rolado). Los resultados mostraron que los tratamientos con CC presentaron efectos positivos sobre el rendimiento de zapallo y la eficiencia del uso del agua (EUA). Este resultado sugiere que los CC actúan regulando la temperatura del suelo, favoreciendo la infiltración y disminuyendo la competencia de malezas, elementos clave para mantener una adecuada humedad edáfica durante etapas críticas como la floración y el crecimiento del fruto. Además, se comprobó que la biomasa generada por el CC aportó nutrientes esenciales como nitrógeno y fósforo, mejorando la fertilidad del suelo de manera gradual. Este aporte resulta clave en suelos pobres en materia orgánica, ya que ayuda a sostener la actividad microbiana y la mineralización de nutrientes, procesos fundamentales para la nutrición del cultivo. Como resultado, los tratamientos con CC lograron rendimientos de zapallo significativamente superiores (con incrementos de entre 100 % y más del 200 %) respecto al testigo sin CC, acompañados de mayor EUA. Estos beneficios muestran que la inclusión de CC no solo mejora la provisión de agua y nutrientes, sino que también favorece indirectamente las condiciones del suelo y el manejo de malezas, permitiendo un mejor desarrollo vegetativo y floral, aspecto fundamental para la formación de frutos de calidad. En síntesis, este ensayo refuerza lo expuesto previamente sobre el valor que tiene los CC-LR como una tecnología adicional para mejorar la sostenibilidad de los predios hortícolas.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación del experimento

El presente experimento fue realizado en el Centro Regional Sur (CRS) de la Facultad de Agronomía, Universidad de la República, ubicado en la localidad de Progreso, Canelones, en el sur de Uruguay ($34^{\circ} 61'$ latitud Sur y $56^{\circ} 22'$ longitud Oeste). El clima de la región es subtropical húmedo, con una temperatura media anual de 17°C . Durante el período comprendido entre mayo y septiembre, pueden registrarse heladas. El régimen de precipitación media anual es de 1200 mm, distribuida uniformemente a lo largo del año (Castaño et al., 2011).

El ensayo tuvo una duración de 10 meses, desde marzo del 2023 hasta enero del 2024, que abarcó el período de un cultivo de cobertura otoño-invernal (marzo-setiembre) y el posterior cultivo hortícola primavera-estival de calabacín (octubre-enero).

3.2 Caracterización del suelo y antecedentes de uso del área

El cuadro utilizado para el experimento presenta 1400 m² ubicado sobre suelo del tipo Vertisol Mólico (hiperéutrico) (IUSS Working Group WRB, 2006) con 10 % arena, 42 % de limo y 48 % de arcilla en el horizonte superficial (Scarlato et al., 2024).

En la Tabla 1 se presentan los valores del análisis físico-químico del suelo en donde se realizó el ensayo.

Tabla 1

Datos analíticos del horizonte superficial del suelo utilizado en el cuadro hortícola

pH	Ca Meq/100g	Mg meq.100g	K Meq/100g	Na Meq/100g	P Bray (ppm) Jun2023	P Bray (ppm) Ene2024	C %
6,8	26,08	6,0	1,4	1,1	114	43	2,9

Nota. El pH se determinó potenciométricamente en relación suelo/agua 1:2,5 (Van Lierop, 1990); el C total por método de Dumas mediante combustión seca (Nelson & Sommers, 1996); el P asimilable con Bray-1 (Bray & Kurtz, 1945) y cuantificación colorimétrica (Murphy & Riley, 1962); y las bases intercambiables (Ca, Mg, K, Na) con extracción de acetato de amonio 1M a pH 7 y posterior determinación por absorción atómica/emisión (Isaac & Kerber, 1971; Warncke & Brown, 1998).

El cuadro experimental se encuentra bajo manejo orgánico desde el año 2019, entre 2019 y 2022 se realizó un experimento para evaluar los efectos del sistema de LR vs LC (Scarlato et al., 2024). El manejo en dicho período consistió en CC estival de *Setaria itálica* y *Vigna unguiculata*, y cultivo de cebolla inverno-primaveral. Anualmente, previo al CC, se incorporó estiércol de pollo al suelo. Una vez terminado el ensayo, se sembró un CC de avena hasta primavera 2022, posteriormente se lo mantuvo en barbecho con cortes periódicos con rotativa hasta el comienzo del trabajo que aquí se presenta.

3.3 Tratamiento y diseño experimental

Se evaluaron ocho tratamientos, correspondientes a una combinación de cuatro tratamientos de manejo actual (parcela chica) y dos historias de manejo previo (parcelas grandes). Los tratamientos actuales consistieron en LR con CC con dos densidades de siembra (D1 y D2), agregado de mulch extra (D2+M) y suelo desnudo (SD); y las historias de manejo previo fueron: LC y LR.

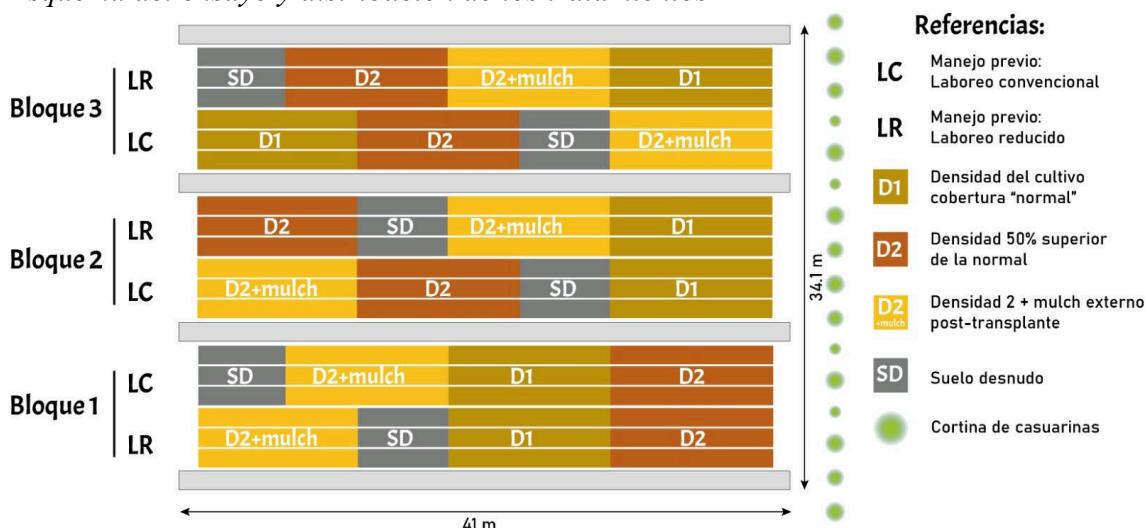
La densidad de siembra en el tratamiento D1 correspondió a 90 kg/ha de centeno (*Secale cereale*) y 80 kg/ha de lupino azul (*Lupinus angustifolius*), mientras que en el tratamiento D2 fue de 135 kg/ha de centeno y 120 kg/ha de lupino. El tratamiento SD no tuvo CC. El tratamiento D2+M tuvo una densidad de siembra del CC similar a D2, y la incorporación del mulch extra en superficie un mes post trasplante del cultivo comercial de calabacín (9 de noviembre), a razón de 2 kg por metro lineal de cantero. El mulch extra provenía de una pradera de avena del CRS y tenía una relación C/N de 28.

El diseño experimental fue en bloques completamente al azar (DBCA) con parcelas divididas, con tres bloques. Dentro de cada bloque, la parcela grande estuvo definida por la historia previa de manejo del laboreo del suelo (LR y LC), y las parcelas chicas o subparcelas definidas por el tratamiento actual (D1, D2, D2+M, SD) (Fig.1). Totalizando 24 parcelas (3 bloques x 2 historias de manejo x 4 tratamientos).

El área total del ensayo fue de 1400m², el largo de canteros fue de 40 m y una distancia de 1,5 m de centro a centro entre ellos. Cada parcela experimental consistió de 3 canteros contiguos; 10 m de largo en el caso de D1, D2 y D2+M, y 4 m de largo en el caso de SD (Figura 1). Las parcelas se separaron por un área de borde de 1m entre tratamientos actuales en un mismo cantero, y un cantero entre bloques. La orientación de los canteros era de este a oeste.

En la Figura 1 se representa el croquis del ensayo.

Figura 1
Esquema del ensayo y distribución de los tratamientos



3.4 Preparación del suelo

El laboreo de suelo para la siembra inicial del CC se desarrolló durante la primera quincena de marzo de 2023. Se efectuó mediante laboreo convencional, realizando dos pasadas con excéntrica en el sentido de las parcelas experimentales mencionadas en la historia del cuadro, posteriormente dos pasadas de encanteradora. El 21 de marzo se incorporaron 28,4 Mg MS de compost/ha, equivalente a 7 kg de compost fresco por metro lineal de cantero, localizado sobre los canteros utilizando una abonadora de tiro. Luego, se reencanteró livianamente para incorporar el compost y se pasó una rastra liviana para el afinado del cantero previo a la siembra del CC (Figura 2). El compost fue muestreado y se realizaron determinaciones de su composición química previo a su aplicación (Tabla 2).

A continuación, la Figura 2 representa las etapas de preparación del suelo.

Figura 2

Secuencias de laboreo, preparación del suelo para la siembra del CC



En la Tabla 2 se presenta el análisis del contenido de nutrientes del compost incorporado en la preparación del suelo.

Tabla 2

Caracterización del compost (expresado en base seca)

MS	pH	N	C	C/N	P	Ca	Mg	K	Na
%		g/kg	g/kg		%	%	%	%	%
65	7,1	24	147	6,12	0,95	4,10	0,30	0,45	0,35

3.5. Manejo y desarrollo del cultivo de cobertura, y evolución de la cobertura durante el experimento

El CC se sembró manualmente al voleo el 26 de abril, a las densidades acordes a cada tratamiento. El lupino, de la variedad Lila baer, fue previamente inoculado con Nitrasec Ornithopus. El CC tuvo una duración de 160 días, una vez alcanzado el estado de grano lechoso (15/9) se procedió al cortado y acamado mediante rolo faca (Figura 3).

El desempeño del CC fue similar entre los tratamientos testeados. La biomasa total del CC al momento del acamado fue en promedio 13 Mg MS/ha, explicado el 93 % por

centeno, 4 % por lupino y 3 % por malezas, y la relación C/N promedio fue 15 (Tabla 3). Es de destacar que si bien al momento del acamado, la biomasa aérea del lupino era muy baja, debajo del centeno se observó un mantillo de lupino sobre el suelo en descomposición. Esta especie había tenido un gran crecimiento y desarrollo hasta finales de junio alcanzando plena floración, luego de la cual comenzó a senescer y el centeno a ocupar el espacio.

En la Figura 3 se puede apreciar etapas del ciclo y manejo del acamado del CC, y en la Tabla 3 el resultado de cantidad y calidad de biomasa generada al acamado.

Figura 3
Evolución y manejo del acamado del CC



Tabla 3
Biomasa total y por especie al acamado del cultivo de cobertura (Mg MS/ha)

<i>Historia de laboreo</i>	<i>Tratamiento</i>	<i>Biomasa Total</i>	<i>Biomasa centeno</i>	<i>Biomasa lupino</i>	<i>Biomasa malezas</i>	<i>Relación C/N</i>
LC	D1	12,2	11,3	0,9	0,1	12,4
	D2	11,7	11,3	0,3	0,1	13,5
	D2 + M	13,0	11,5	1,2	0,3	16,6
LR	D1	12,9	11,3	0,5	1,1	14,1
	D2	14,0	13,0	0,4	0,6	15,0
	D2 + M	12,8	12,6	0,0	0,2	18,0

Nota: LC: laboreo convencional; LR: laboreo reducido; D1 densidad 1; D2 densidad 2; D2+M densidad 2 más el agregado del mulch extra.

La cobertura del suelo se evaluó 25 días pre-finalización del CC y durante el cultivo comercial en dos momentos del ciclo, a los 43 (Tabla 4) y 101 días post trasplante de calabacín (Tabla 5) utilizando un rugosímetro, con 32 varillas a 5 cm de distancia cada

una, colocado transversalmente sobre el cantero, y registrando lo que tocaba cada varilla. Se realizó una medición por parcela al azar.

A los 25 días pre-finalización del CC se puede apreciar que todos los tratamientos con CC tuvieron 0 % de suelo desnudo, y la cobertura del suelo fue más de 80-90 % explicada por el CC. El SD tuvo entre 5 y 10 % de suelo desnudo, y más del 90 % del suelo cubierto por malezas (Tabla 4).

En la Tabla 4 podemos observar los porcentajes de suelo cubierto registrados.

Tabla 4

Porcentaje de suelo desnudo y cobertura total al 21/05/23 en LC y LR

		<i>Suelo desnudo</i>	<i>Cobertura</i>	<i>Centen o</i>	<i>Lupin o</i>	<i>Centeno + Lupino</i>	<i>Centeno+ Maleza</i>	<i>Malez a</i>
LR	D1	0	100	76	1	1	16	6
	D2	0	100	84	2	9	5	0
	D2 M	+	0	100	80	0	3	17
	SD	5	95	0	0	0	0	95
LC	D1	0	100	65	0	17	14	4
	D2	0	100	87	1	10	2	0
	D2 M	+	0	100	74	0	7	16
	SD	10	90	0	0	0	0	90

Nota: LC: laboreo convencional; LR: laboreo reducido; SD Suelo desnudo; D1 densidad 1; D2 densidad 2; D2+M densidad 2 más el agregado del mulch extra.

A los 43 y 101 días post trasplante del cultivo comercial el porcentaje de suelo desnudo en el tratamiento SD fue siempre mayor a 50 % (Tabla 5 y 6). En tanto, a los 43 días post trasplante la cobertura del suelo en D2+M fue 100 %, explicándose en más de un 90 % por la cobertura del mulch extra (Tabla 5), a los 101 días post trasplante la cobertura fue superior al 80 % en los tratamientos D1, D2 y D2+M (Tabla 6). En el caso del tratamiento D2+M, a los 55 días post trasplante el mulch tenía una altura promedio de 12 cm, y una altura al final de ciclo del cultivo comercial de 5 cm promedio.

En la Tabla 5 observamos los registros realizados a los 43 días post trasplante.

Tabla 5

Porcentaje de suelo desnudo y cobertura desglosado por tipo, al 22/11/23

		<i>Suelo Desnudo</i>	<i>Centeno</i>	<i>Mulch</i>	<i>Maleza + Mulch</i>	<i>Maleza</i>
LR	D1	11	0	68	0	21
	D2	0	4	78	0	18
	D2 + M	0	0	92	0	8
	SD	69	0	0	11	20
LC	D1	16	0	59	14	11
	D2	18	0	60	0	22
	D2 + M	0	0	100	0	0
	SD	59	0	0	27	14

Nota: LC: laboreo convencional; LR: laboreo reducido; SD Suelo desnudo; D1 densidad 1; D2 densidad 2; D2+M densidad 2 más el agregado del mulch extra.

En la Tabla 6 se observan los registros de la última evolución antes de la cosecha del cultivo comercial.

Tabla 6

Porcentaje de suelo desnudo y cobertura desglosado por tipo, al 19/01/24

		<i>Suelo desnudo</i>	<i>Cobertura total</i>	<i>Cultivo</i>	<i>Cobertura mulch</i>	<i>Maleza</i>
LR	D1	0	100	35	40	25
	D2	18	82	30	49	3
	D2 + M	4	96	36	48	12
	SD	50	50	23	16	11
LC	D1	16	84	35	36	13
	D2	2	98	18	49	31
	D2 + M	2	98	34	53	11
	SD	67	33	17	0	16

Nota: LC: laboreo convencional; LR: laboreo reducido; SD Suelo desnudo; D1 densidad 1; D2 densidad 2; D2+M densidad 2 más el agregado del mulch extra.

En la Figura 4 se puede apreciar los distintos momentos de evaluación de la biomasa.

Figura 4

Evaluación de cobertura de suelo

Etapas de evaluación de la Biomasa y la composición de la cobertura con el Rugosímetro



3.6 Manejo del cultivo comercial

El cultivo comercial evaluado en el ensayo fue calabacín (*Cucurbita moschata Duch*) var. Atlas. El método de implantación fue mediante plantines a raíz cubierta. El almácigo se realizó en un invernáculo en el CRS. El calabacín se sembró en almacigueras de 32 cavidades de 6 por 6 cm, con un volumen de celda aproximado de 216 cm³, el 18 de septiembre del 2023.

El trasplante se realizó el 10 de octubre, y el 19 de octubre se realizó una reposición de plantines debido a daños ocasionados por heladas (menor al 2 %). Previo al trasplante se realizó una pasada de pincho en el medio de los canteros, donde fueron colocados los plantines. El marco de plantación utilizado fue en una fila al medio de cada cantero (150 cm entre canteros), y a 60 cm entre plantas, con una densidad inicial de 11100 plantas por hectárea.

Se colocó una línea de goteros al centro del cantero, con goteros distanciados 20 cm, y se regó desde trasplante y durante todo el ciclo. El riego fue ajustado con datos de ETo (mm/día) tomados de la estación meteorológica del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) Las Brujas, ubicada en Ruta 48 km 10 - Canelones (34°40'S 56°20'W) y corregidos con datos pluviométricos medidos en el CRS. El riego fue homogéneo, con un caudal de 1 L/ h y se regaron un total de 104 horas durante el ciclo del cultivo comercial (equivalente a 385 mm).

Durante el cultivo los problemas sanitarios de mayor relevancia se refirieron a la presencia de pulguilla (*Sminthurus viridis*) en etapas iniciales del cultivo, para lo cual se realizaron dos aplicaciones de Aceite de Neem.

El control de malezas en el tratamiento SD fue totalmente manual para reducir la perturbación del suelo, realizado en tres fechas (27/10/23-07/11/23-30/11/23), las especies predominantes fueron *Alternanthera philoxeroides*, *Sonchus spp.*, *Stellaria media*, *Stachys arvensis* y *Coronopus didimus*. En el caso de los tratamientos con CC hubo control manual de malezas solamente en el primer mes post trasplante, cuando fue necesario eliminar el rebrote de centeno, y no se realizaron más controles posteriormente en el ciclo.

La cosecha del cultivo se realizó manualmente a los 105 días después del trasplante (24 de enero de 2024), en una sola pasada.

3.7 Determinaciones

3.7.1 Suelo

3.7.1.1 Determinaciones físicas

Se determinó la densidad aparente (DAp) mediante la metodología de aros imperturbados (Blake & Hartge, 1986). El primer muestreo se llevó a cabo el 14 de junio de 2023, durante la fase de crecimiento del CC. La segunda evaluación realizada fue al finalizar el ciclo del cultivo comercial (finales de enero). Dado que los aros presentaban dimensiones distintas, las comparaciones se efectuaron entre tratamientos dentro de cada fecha. En ambas fechas se tomaron tres aros por parcela a una profundidad (5 a 9 cm). Las muestras fueron llevadas al laboratorio de Suelos de la sede Sayago de la Facultad de Agronomía, en dónde se determinó la DAp por el cociente del peso de la muestra secada a 105 °C en estufa hasta peso constante, sobre el volumen del cilindro que contenía la muestra. Previo al secado en estufa, las muestras se saturaron y se recortó el suelo que por expansión excedía el volumen del aro.

La resistencia a la penetración se determinó mediante un penetrómetro de cono (Field Scout SC 900), el cual registra la resistencia a la penetración a intervalos de 2,5 cm de profundidad hasta los 45 cm. La evaluación se realizó en dos momentos, apareados a la medida de DAp, durante el CC (25/07/23) y a fin de cultivo comercial (25/01/24) y se tomaron tres mediciones por parcela.

El contenido de humedad del suelo se midió diariamente, cada 6 horas, desde su instalación (50 días post trasplante) a fin de ciclo del cultivo. Por medio de sensores (Decagon Teros 10 y Teros 11 (METER Group, Inc., Pullman, WA, USA), colocados a una profundidad de (0-10cm). Se midió la temperatura de suelo a partir de los 45 días desde el trasplante y durante el ciclo del cultivo comercial, a paso horario en tres profundidades distintas (1-5, 8-11, 15-18 cm de profundidad). Para esto se utilizaron sensores HOBO® MX2201, colocados en 4 parcelas de cada tratamiento actual asignadas de forma aleatoria (bloques 1-LC, bloque 2-LC, bloque 2-LR y bloque 3-LR).

3.7.1.2 Determinaciones químicas

Se realizaron muestreos de suelos en cada parcela en 4 oportunidades: durante el CC (junio 2023), al trasplante del cultivo comercial (octubre 2023), durante el desarrollo del calabacín (noviembre 2023), y a fin de ciclo de calabacín (enero 2024).

En las cuatro fechas de muestreo, se recolectaron muestras compuestas por 10 submuestras distribuidas al azar dentro de cada parcela, obtenidas con calador a una profundidad de 0-20 cm. Las submuestras se mezclaron para homogeneizarlas, se secaron a 40 °C durante 48 horas, y posteriormente se molieron y tamizaron utilizando un tamiz de 2 mm. Se determinó el contenido de amonio ($N-NH_4$) por método colorimétrico de Berthelot con Phenylphenol (Rhine et al., 1998), y el contenido de nitratos ($N-NO_3$) por

método colorimétrico (Mulvaney, 1996). Se calculó el nitrógeno mineral total como la suma de N-NH₄ y N-NO₃.

3.7.1.3 Determinaciones de la actividad microbiológica

Se realizaron muestreos de suelo en cada parcela en tres momentos clave del ciclo de cultivo y apareado a las determinaciones químicas del suelo: durante el CC (junio de 2023), en el desarrollo del calabacín (noviembre de 2023) y al final del ciclo del cultivo (enero de 2024).

El muestreo para evaluar la actividad microbiológicas se llevó a cabo siguiendo el mismo procedimiento que para el muestreo químico, sin embargo, en esta ocasión las muestras fueron obtenidas mediante un calador a una profundidad de 0-15 cm. Las submuestras se mezclaron para homogeneizarlas, se orearon a temperatura ambiente y posteriormente se tamizaron a 2 mm.

Se evaluó el potencial de mineralización de nitrógeno (PMN), el cual se determinó siguiendo el método de incubación anaeróbica descripto por Schinner et al. (1996). Se colocaron 5 g de suelo fresco en tubos de vidrio herméticos, añadiendo suficiente agua destilada para alcanzar una relación suelo:agua de 1:2,5 (p/v), asegurando condiciones anaeróbicas mediante el llenado completo del recipiente y la ausencia de burbujas de aire. Los tubos se incubaron a 40 °C durante 7 días en oscuridad. Transcurrido el período de incubación, el N amoniacial (NH₄⁺-N) se extrajo con 17 mL de KCl 2 M mediante agitación durante 30 minutos y posterior filtrado a través de papel Whatman N° 42. La concentración de NH₄⁺-N en el extracto se determinó por espectrofotometría (650 nm) según Rhine et al. (1998). El potencial de mineralización de N se calculó como la diferencia entre el NH₄⁺-N extraído al final de la incubación y el contenido inicial de NH₄⁺-N en el suelo fresco antes de la incubación y se expresó como mg NH₄⁺-N kg⁻¹ de suelo seco.

A su vez, se determinó el potencial de nitrificación (PN), mediante el método de microescala basado en Hoffmann et al. (2007). Se colocaron 2,5 g de suelo fresco en matraz de 50 mL a los que se le añadieron 7,5 mL de una solución compuesta por KH₂PO₄ (300 mM), K₂HPO₄ (700 mM), Cloruro de Sodio (10 mM) y (NH₄)₂SO₄ (1,5 mM), ajustada a pH 7,2. Se incubó en agitador orbital a 175 rpm a 25°C y oscuridad. A las 24hs se tomó una alícuota de 1mL de la mezcla de suelo al cual se le agregó 1 mL de KCl 2M, se agitó y luego se centrifugó a 13000 rpm durante 1 minuto. La concentración de nitrito (NO₂⁻) se determinó en 0,5 mL del sobrenadante al cuál se le agregó 0,3 mL de cloruro de amonio (0,19M) y detección colorimétrica con los reactivos de Griess-Ilosvay, por espectrofotometría a 540 nm. La actividad se expresó como µg NO₂⁻-N día⁻¹ g⁻¹ de suelo seco.

Se estimó la respiración basal del suelo (RB), mediante la determinación del CO₂ liberado, producto de la mineralización por los microorganismos del suelo, cuando el suelo se incubó en condiciones controladas de temperatura y humedad por un lapso de tiempo determinado según el método de Öhlinger et al. (1996) con algunas variaciones. Se pesaron 25 g de suelo que se llevaron a 60 % de capacidad de campo y se dispusieron

en una bolsita de nylon perforada colgada en el interior de una botella con 20 ml de solución NaOH 0,25 M, sin estar en contacto. Como controles se usaron bolsas vacías. A continuación, las botellas con el suelo se cerraron herméticamente y se incubaron por 4 días a 25 °C. Durante la incubación, el CO₂ liberado por la respiración reacciona con el NaOH formando carbonato de sodio. Posteriormente de la incubación, se agregaron 2 ml de BaCl₂ 0,5 M, lo cual convierte al carbonato de sodio en carbonato de bario insoluble. Se agregaron unas gotas del indicador de pH fenolftaleína para hacer la titulación con HCl 0,1 M y determinar el remanente de NaOH en la solución. Por último, con una fórmula se estableció la cantidad de CO₂ respirado por gramo de suelo seco por día, según el coeficiente que aparece en Öhlinger et al. (1996) y corrigiendo por el índice de humedad del suelo:

$$(\square - \square) \times 2,2 / SW$$

C = ml de HCl consumido por control

S = ml de HCl consumido por muestra

2,2 = factor de conversión

SW = peso inicial del suelo

La respiración se expresó como mg de CO₂ g⁻¹ suelo seco día⁻¹.

3.7.2 Cultivo comercial de calabacín

3.7.2.1 Evaluación del crecimiento y desarrollo sobre los distintos tratamientos.

El estado de crecimiento y desarrollo del cultivo de calabacín se evaluó por método no destructivo a los 43 días post trasplante. Para ello se observaron 10 plantas al azar por parcela, se evaluó el estado de desarrollo (vegetativo/reproductivo), si presentaban o no guías, se contabilizó el número total de hojas, el número de hojas completamente desarrolladas y su estado sanitario. Apareado a esta evaluación, se recolectaron muestras foliares de cada parcela para determinar el estado nutricional de las plantas en los distintos tratamientos. Se tomaron al azar de cada parcela 10 hojas con pecíolo, jóvenes, completamente desarrolladas y sanas. Estas muestras fueron secadas a 60 °C durante 48 horas y luego molidas para su posterior análisis en laboratorio de suelos de Facultad de Agronomía, donde se determinó el contenido de nitrógeno total por el método Dumas por combustión seca (Nelson & Sommers, 1996) en un equipo Thermo Fisher Scientific, Modelo Flash 1112 Elemental Analyzer.

A los 57 días post trasplante se realizó un muestreo destructivo de planta entera para determinar el crecimiento y desarrollo del cultivo. Se extrajeron 2 plantas al azar por parcela. Se fraccionaron por órgano (hojas, tallos, flores femeninas y frutos), y se secaron a 60°C por 72 hs, hasta peso constante. Se cuantificó el peso fresco y seco de hojas, tallos y frutos. Durante el mismo muestreo, el Índice de Área Foliar (IAF, cm hoja² cm suelo⁻²) fue estimado en base al peso seco de hojas, la densidad de plantas del cultivo y el área foliar específica (AFE, cm² hoja por g de hoja seca; Fang et al., 2019). Para determinar el AFE se utilizó un sacabocado de 2 cm de diámetro para extraer 12 aros de hojas

completamente desarrolladas y en buen estado sanitario por parcela. A partir del peso seco de los aros y el área de los mismos se determinó el AFE, y a partir del AFE y el peso seco de hoja total, se estimó el IAF.

3.7.2.2 Rendimiento y calidad

El rendimiento fue medido el 24 de enero de 2024, 105 días después del trasplante. Para determinar el rendimiento se delimitaron sub-parcelas de cosecha de 4 metros lineales del cantero central de cada parcela (donde no existieron muestreos destructivos de plantas) en los tratamientos D1, D2 y D2 + M. En el tratamiento SD se cosechó la totalidad del cantero central de la parcela de 4 m.

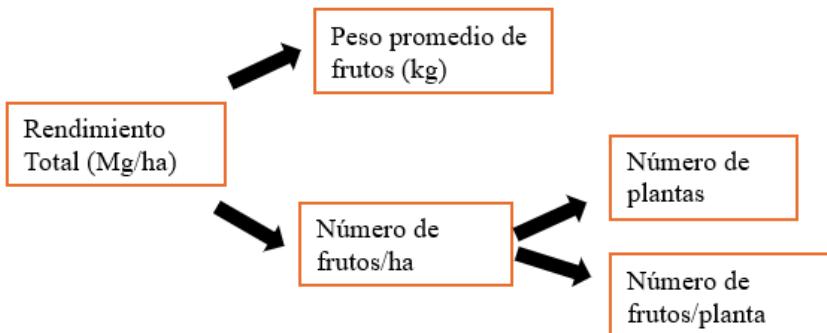
En cada subparcela se contabilizaron el número de plantas, y se cosecharon todos los frutos. Los frutos se clasificaron según su estado de madurez (frutos maduros, próximos a cosecha o virando de color, y verdes o en crecimiento), y por tamaño. Los frutos maduros incluyeron aquellos aptos para cosecha comercial, definidos por haber alcanzado el tamaño final y el color característico del cultivo. Los inmaduros o virando color correspondieron a aquellos que no alcanzaron el grado de desarrollo requerido para la cosecha comercial, incluyendo frutos próximos a cosecha y frutos verdes en crecimiento. Para los frutos maduros y próximos a cosecha se definieron las siguientes categorías de acuerdo con el Manual de tipificación de calidad de frutas y verduras (Observatorio Granjero, s.f.): Extra grande (> 2 kg), grandes (1,6- 2 kg), medianos (1,2- 1,6 kg), chicos ($< 1,2$ kg); se registró el número de frutos y peso por categoría. Se determinó también el peso y número de frutos de descarte, registrando el motivo de descarte si era por rajaduras severas ($> 50\%$ de fruto afectado por rajado), pudrición blanda, u otros.

En lo que respecta a los frutos verdes en crecimiento, se cuantificó la cantidad como forma de estimación del rendimiento “sacrificado” al realizar una sola cosecha y temprano en la estación.

Se evaluaron los componentes del rendimiento (Figura 5), considerando la densidad de plantas establecidas, el número de frutos (frutos/planta y frutos/ha), el peso promedio de fruto y las variables de rendimiento expresadas en kg/planta y Mg/ha. El rendimiento se clasificó en total (todas las categorías de frutos) y comercial (solo frutos comerciales, maduros y próximos a cosecha), registrándose además la proporción de descartes y de frutos verdes por tratamiento. El rendimiento se expresó en Mg/ha a partir del total obtenido por unidad experimental; luego se determinó la densidad de plantas del cultivo comercial por hectárea y el número de frutos por planta, con lo cual se calculó el número de frutos por hectárea; finalmente, el peso promedio de fruto se estimó como el cociente entre el rendimiento total y el número de frutos por hectárea.

En la Figura 5 se representa el croquis del rendimiento del cultivo de zapallo.

Figura 5
Componentes del rendimiento del cultivo de calabacín



3.8 Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó empleando un diseño de bloques completos al azar con parcelas divididas. La parcela principal correspondió a la historia de laboreo previa (LR o LC), aleatorizada previamente, y las subparcelas recibieron los cuatro tratamientos actuales asignados de forma aleatoria dentro de cada parcela principal.

En forma clásica, el modelo de parcelas divididas en bloques es:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \gamma_k + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

μ es la media general,

τ_i representa el efecto del bloque,

β_j el efecto del tratamiento A (parcela grande: historia de manejo del laboreo previo),

γ el efecto del tratamiento B (parcela chica o subparcela: tratamiento actual)

ε_{ijk} es el error aleatorio asociado a la observación.

Los efectos de historia de manejo y tratamiento actual sobre las variables de respuesta se realizaron mediante modelos lineales mixtos generalizados. Las variables de respuestas fueron: N° de hojas completamente desarrolladas; N° Total de hojas; N foliar (%); Biomasa (g/pl); IAF ; N° frutos por planta; Rendimiento comercial (kg/ha); N° de frutos comercial; Peso medio de fruto comercial; Rendimiento total comercial más descarte; % de descarte; N° de frutos rendimiento total; Peso medio de fruto rendimiento total (kg/h); % de frutos verdes; N° de frutos rendimiento total más verdes; Densidad de plantas inicial; Densidad de plantas final; Amonio (ppm N-NH₄); Nitrato (ppm N-NO₃); Respiración Basal (mg CO₂/g suelo seco); Potencial de nitrificación (mg NO₂-N/g peso seco); Potencial de mineralización del nitrógeno (mg N-NH₄ /kg/día; Densidad aparente (g/cm³); Resistencia a la penetración (kPa). Las variables explicatorias fueron historia de manejo (LC y LR, parcela grande) y tratamiento actual (4, parcela chica), fecha de muestreo cuando correspondió, y sus interacciones. Los efectos aleatorios fueron especificados: interacción historia y bloque como el error total de la parcela (Bloque: Historia), y la interacción tratamiento actual por historia por bloque como el error agrupado (Bloque: Historia: Manejo actual). Se utilizó distribución Gaussian o gamma para el error de variables continuas, y Poisson o binomial negativa para conteos y

proporciones. Para las variables de respuesta con muchos ceros, se realizaron correcciones en el modelo. Los análisis estadísticos se realizaron en RStudio. Los modelos fueron desarrollados utilizando el paquete glmmTMB (Brooks et al., 2017), el paquete DHARMA (Hartig, 2024) para la verificación de supuestos del modelo, y emmeans (Lenth, 2016) para la estimación de medias ajustadas y comparación de tratamientos. Todas las variables fueron analizadas mediante análisis de varianza (ANOVA) tipo II o III, según correspondiera, y se aplicó la prueba de Tukey para la comparación de medias, utilizando un nivel de significancia del 5 % ($\alpha = 0,05$).

4. RESULTADOS

4.1 Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo

4.1.1 Propiedades físicas del suelo y contenido de humedad

La DAp evaluada durante el CC y a fin del cultivo de calabacín (14/07/23-31/01/24) se mantuvo en un rango acotado entre 0,92 g/cm³ y 1,02 g/cm³, sin diferencias consistentes entre tratamientos actuales ni de historia de manejo (ver Anexo A).

La RP presentó una alta variabilidad entre fechas y profundidades, sin un patrón consistente asociado a los tratamientos actuales ni a la historia de manejo, y estando siempre en valores inferiores a 1150 kPa. En la primera fecha durante el CC, se registraron diferencias significativas entre tratamientos en las profundidades 11-20 cm y 21-30 cm. En ambas profundidades el tratamiento SD fue el que presentó menores valores, mientras que D1 y D2+M mostraron los mayores valores de RP que oscilaron entre 466 kPa a 1051 kPa. En la segunda fecha, a cosecha de calabacín, no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos. La RP aumentó con la profundidad en todos los tratamientos, registrándose el mayor valor en el tratamiento LC-SD de 1107 kPa. Nuevamente se observó una gran variabilidad entre las profundidades e historia, sin relación evidente con el manejo (Anexos A y B).

En cuanto al contenido de humedad volumétrico del suelo en los primeros 10cm, se mantuvo en un rango entre 20- 35% HV desde la instalación de los sensores hasta la cosecha del cultivo comercial (Anexo C). Presentando el tratamiento D2+M LR los mayores contenidos de humedad en la totalidad de los días evaluados, manteniéndose a más de 65% HV del valor relativo a capacidad de campo (CC).

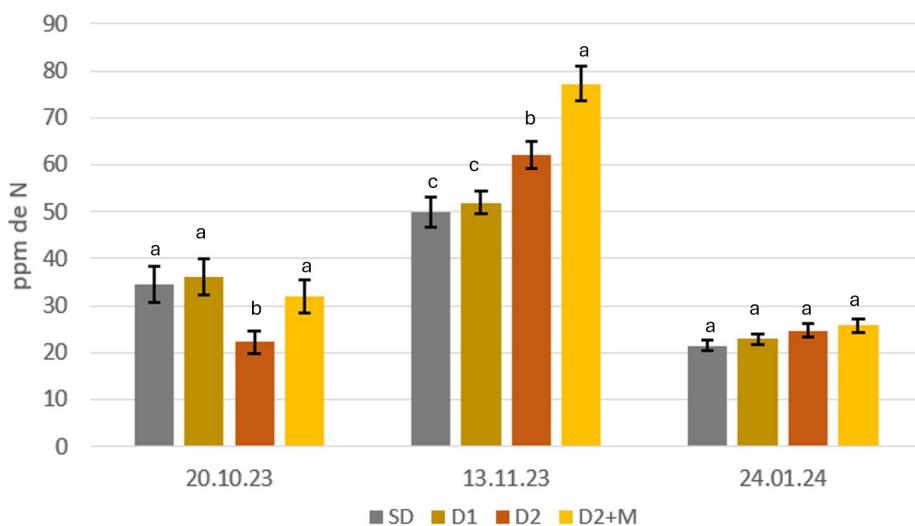
4.1.2 Propiedades químicas del suelo

En el muestreo realizado 10 días post trasplante de calabacín (20/10/23) se observó un efecto tratamiento actual sobre el N mineral total del suelo. Los tratamientos SD, D1 y D2+M fueron los que mostraron valores más altos, mientras que D2 presentó el valor más bajo (Fig. 6). A un mes de trasplante (13/11/23), hubo un aumento generalizado en todos los tratamientos, D2+M fue el que presentó el valor más elevado (77 ppm), seguido por D2, mientras que SD y D1 mostraron los valores más bajos (Figura 6). En el muestreo a cosecha (24/1/24), los contenidos de N mineral no mostraron diferencias entre tratamientos, oscilando entre 21 y 26 ppm (Figura 6).

En la Figura 6 se puede observar las ppm de N mineral registradas en el periodo de evaluación.

Figura 6

Nitrógeno mineral ($NH_4^+ + NO_3^-$) en el suelo durante el cultivo calabacín en tres momentos del ciclo



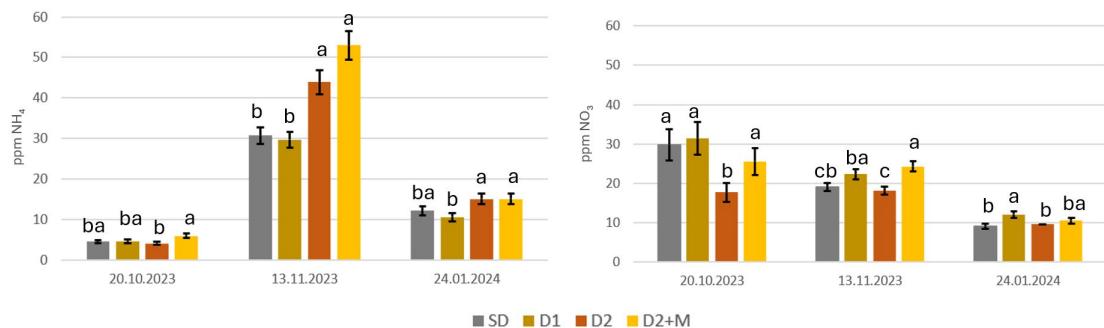
Nota. En cada fecha, letras distintas implica diferencias significativas ($p \leq 0,5$). No presento efecto de historia previa

En lo que respecta a amonio y nitrato, se pudo apreciar que, para la primera fecha, los valores de amonio fueron bajos (menor a 10ppm), evidenciándose una diferencia en el contenido de amonio del tratamiento D2+M respecto a D2 de un 10% más alto, mientras que SD y D1 presentaron un comportamiento intermedio. Para nitrato se observó un valor mayor del tratamiento D1, seguido por SD y D2+M, diferenciándose de D2 que mostró los valores más bajos (Figura 7). En la segunda fecha, los valores de amonio se duplican en los tratamientos D2+M y D2, en tanto que los valores más bajos fueron en SD y D1. El nitrato, también fue mayor en D2+M, seguido por D1, luego SD, y D2 con los valores más bajos. En la tercera fecha, los contenidos de amonio decrecieron respecto a la evaluación anterior, y los tratamientos D2 y D2+M tuvieron los valores más elevados, SD presentó un comportamiento intermedio, y D1 el contenido más bajo. Para nitrato, también se observaron valores más bajos en general, sin embargo, hubo efecto entre tratamiento, siendo D1 el más elevado, D2+M con comportamiento intermedio, SD y D2 con los valores más bajos (Figura 7).

En la Figura 7 encontramos a la izquierda el gráfico de amonio y a la derecha el gráfico de nitrato.

Figura 7

Contenido de amonio y nitrato en suelo en tres momentos del ciclo de calabacín



Nota. En cada fecha, letras distintas implica diferencias significativas ($p \leq 0,5$). No presento efecto de historia previa

4.1.3 Propiedades biológicas del suelo

La respiración basal y el PMN evaluados durante el desarrollo del CC (28/6/23) fue superior en el tratamiento D1 respecto al SD, y el D2 y D2+M tuvieron un comportamiento intermedio (Figura 8 y Figura 9). El PN fue mayor en el D2+M respecto al D2, en tanto los otros tratamientos no se diferenciaron (Figura 10).

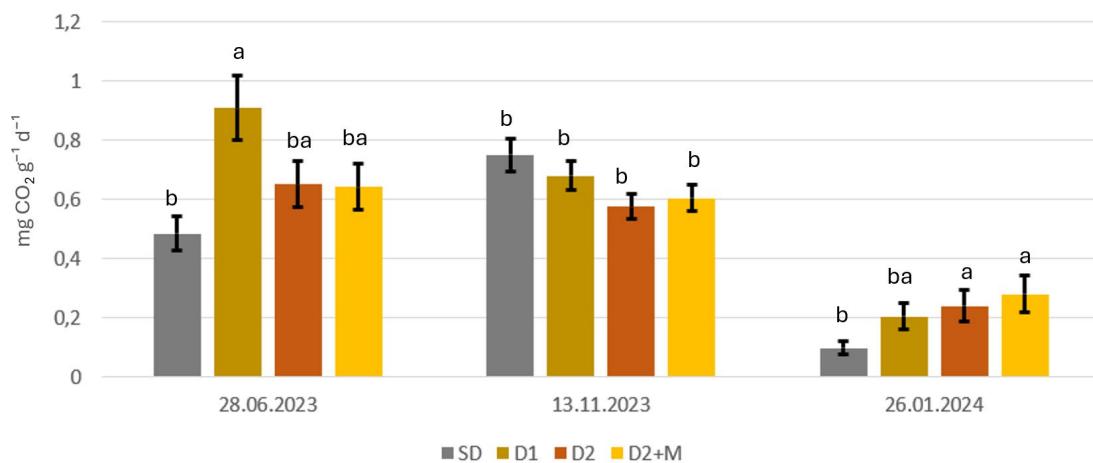
Post trasplante del calabacín (13/11), no se evidenció un efecto claro entre los tratamientos sobre la respiración basal (Figura 7). En relación al PN, no se evidenció efecto tratamiento.

A cosecha de calabacín (26/1), se observaron niveles de respiración en general más bajos que las fechas previas, y un efecto marcado de la cobertura sobre la respiración basal, con mayores valores en los tratamientos D2 y D2+M en comparación con el SD. El PMN fue mayor en D2 y D2+M respecto a SD, en tanto D1 presentó un comportamiento intermedio. El PN fue mayor en D1 (Figura 9).

A continuación, en la Figura 8 se representa gráficamente la respiración microbiana como indicador de la actividad biológica global de suelo.

Figura 8

Respiración basal del suelo durante el cultivo de cobertura, posttrasplante y cosecha de calabacín

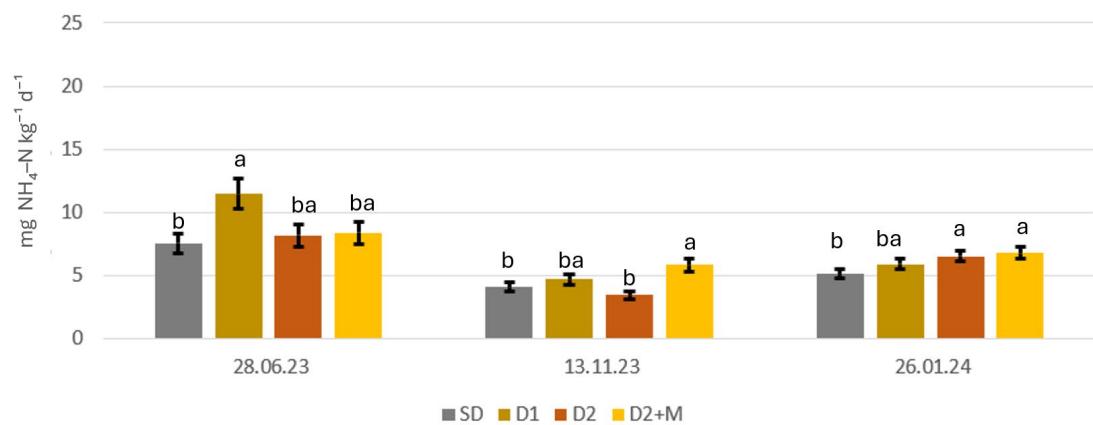


Nota. En cada fecha, letras distintas implica diferencias significativas ($p \leq 0,5$). No presento efecto de historia previa

Las Figuras 9 y 10 presentan las gráficas correspondientes al PMN y al PN, indicadores biológicos clave en la dinámica del suelo.

Figura 9

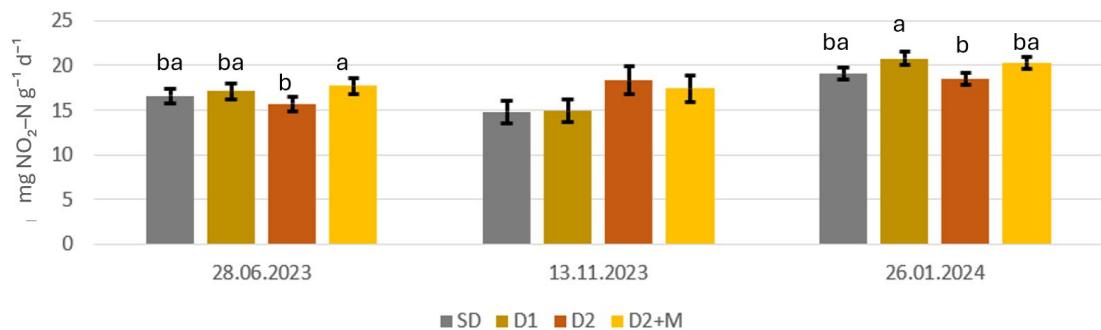
Potencial de mineralización del nitrógeno durante el CC, post trasplante y cosecha de calabacín



Nota. En cada fecha, letras distintas implica diferencias significativas ($p \leq 0,5$). No presento efecto de historia previa

Figura 10

Potencial de nitrificación durante el cultivo de cobertura, post trasplante y cosecha de calabacín



Nota. En cada fecha, letras distintas implica diferencias significativas ($p \leq 0,5$). No presento efecto de historia previa

4.2 Crecimiento y desarrollo, rendimiento y componentes del rendimiento del cultivo de calabacín

4.2.1 Crecimiento y desarrollo del cultivo de calabacín

El número de hojas totales de las plantas de calabacín a los 43 días post trasplante (dpt) mostró diferencia entre tratamientos y entre la historia de manejo previo. En historia de manejo previo con LR, el tratamiento SD tuvo mayor número de hojas que los demás tratamientos (31 vs. 27; 26; 25 para D2, D1 y D2+M, respectivamente), en cambio en las parcelas con historia de manejo LC, el SD presentó mayor número de hojas que D1 (27 vs. 23), pero no se diferenció estadísticamente de D2 y D2+M, los cuales mostraron un comportamiento intermedio (Tabla 7). Con respecto a la biomasa por planta a los 57 dpt, en LR no hubo diferencias entre tratamientos, sin embargo, en LC, el SD tuvo mayor biomasa que D1, mientras que D2 y D2+M presentaron valores intermedios. En cuanto al IAF a los 57 dpt, no hubo diferencias significativas entre tratamientos, dicho resultado está explicado por la compensación entre el mayor tamaño individual de las plantas en SD y su menor densidad de plantas (Tabla 7).

El contenido de nitrógeno foliar realizada a los 57 dpt (22/11/23) mostró una interacción entre historia de manejo previo y los tratamientos actuales, sin embargo, no hubo diferencias estadísticas del manejo actual dentro de cada historia de manejo, debido a la alta variabilidad de los datos encontrados. Los valores promedio de N foliar oscilaron entre 4,0 y 4,8 % en todos los tratamientos, sin evidenciar diferencias marcadas entre tratamientos (ver Anexo D).

La Tabla 7 presenta las variables medidas durante el crecimiento y desarrollo del cultivo.

Tabla 7*Crecimiento y desarrollo del cultivo calabacín a los 43 y 57 días post trasplante (dpt)*

	SD	D1	D2	D2+M	
Nº total de hojas (43 dpt)	LR LC	$31,2 \pm 2,0\text{ a}$ $26,8 \pm 1,7\text{ a}$	$25,5 \pm 1,7\text{ b}$ $22,8 \pm 1,5\text{ b}$	$26,8 \pm 1,7\text{ b}$ $24,0 \pm 1,6\text{ ab}$	$24,8 \pm 1,6\text{ b}$ $26,1 \pm 1,7\text{ ab}$
Biomasa (g MS/pl) (57 dpt)	LR LC	$62,6 \pm 11,1\text{ b}$ $112,9 \pm 20,0$	$56,6 \pm 10,0\text{ b}$ $54,3 \pm 9,6\text{ b}$	$89,7 \pm 15,9\text{ b}$ $63,0 \pm 11,2$	$93,4 \pm 16,5\text{ b}$ $75,9 \pm 13,4$
IAF (cm hoja ² cm suelo ⁻²) (57 dpt)	LR LC	$1,19 \pm 0,26$ $1,40 \pm 0,30$	$0,92 \pm 0,20$ $0,94 \pm 0,20$	$1,37 \pm 0,30$ $1,11 \pm 0,24$	$1,36 \pm 0,3$ $1,33 \pm 0,29$

Nota. Letras distintas implica diferencias significativas ($p \leq 0,5$). LR; Labore reducido; LC: Laboreo Convencional

4.2.2 Rendimientos y componentes del rendimiento del cultivo de calabacín

El rendimiento total promedio de calabacín fue de 47 Mg/ha, sin presentar diferencias entre tratamientos (Tabla 8). El rendimiento comercial se mantuvo en valores entre 45 y 48 Mg/ha, sin diferencias entre tratamientos. Los niveles de descarte fueron bajos en todos los casos, menor al 2 %, sin diferencias entre tratamientos. El motivo de estos descartes fue rajado y podredumbre blanda. A pesar de que la cosecha se realizó tempranamente, en una pasada, el porcentaje de frutos verdes remanentes en la planta fue reducido, 8 % de los frutos totales, en promedio, sin evidenciarse diferencias entre tratamientos.

En la siguiente Tabla 8 se detallan los resultados obtenidos de la cosecha.

Tabla 8*Rendimiento comercial y total de calabacín, proporción de descarte y frutos verdes*

	SD	D1	D2	D2+M
Rto. Comercial (Mg/ha)	$45,1 \pm 3,6$	$46,1 \pm 3,7$	$46,0 \pm 3,7$	$47,7 \pm 3,8$
Rto. Total (Mg/ha)	$45,1 \pm 3,6$	$47,0 \pm 3,7$	$47,0 \pm 3,7$	$49,0 \pm 3,9$
% Descarte	$0,0 \pm 0,0$	$1,8 \pm 1,0$	$1,9 \pm 1,1$	$2,9 \pm 1,4$
% de número frutos verdes	$7,9 \pm 2,2$	$11,2 \pm 2,4$	$5,3 \pm 1,7$	$7,0 \pm 1,9$

Nota. Valores expresados como media ± error estándar, calculados a partir de tres repeticiones por tratamiento (bloques). No se observaron diferencias significativas ($p \leq 0,05$). No presento efecto de historia previa.

Si bien el rendimiento total no presentó diferencias significativas entre tratamientos, se pudo apreciar variaciones en sus componentes que permiten interpretar posibles mecanismos compensatorios de la especie (Tabla 9). La densidad de plantas fue mayor en D2+M con 9111 pl/ha, en comparación con SD que presentó 6751 pl/ha. En cuanto al número de frutos por planta se evidenció que SD tuvo mayor número respecto a D2 y D2+M, y D1 presentó un comportamiento intermedio (Tabla 9).

A pesar de que el número total de frutos por hectárea no mostró diferencias estadísticas entre tratamientos, se observó una tendencia a mayor cantidad de frutos en SD (29125 frutos/ha), con una diferencia de 3625 frutos respecto al tratamiento D2+M (25500 frutos/ha). El peso medio de fruto fue mayor en D2+M (2 kg), seguido de D2 y D1 (1,7 kg), y SD fue el que presentó el menor peso (1,5 kg).

A continuación, la Tabla 9 detalla los componentes del rendimiento.

Tabla 9

Componentes del rendimiento total del cultivo de calabacín según los diferentes tratamientos de cobertura

	<i>SD</i>	<i>D1</i>	<i>D2</i>	<i>D2+M</i>
Densidad (Nº plantas/ha)	$6751 \pm 429 b$ <i>ab</i>	8317 ± 529	$9111 \pm 579 a$	$9111 \pm 579 a$
Nº Frutos/planta	$6,63 \pm 0,37 a$ <i>ab</i>	$5,68 \pm 0,32$	$5,36 \pm 0,30 b$	$5,21 \pm 0,29 b$
Nº Frutos/ha	29125 ± 27599 $1950 \quad 1850$	27526 ± 1840	25500 ± 1710	
Peso medio de fruto (kg)	$1,53 \pm 0,05 b$ <i>ab</i>	$1,72 \pm 0,06$	$1,70 \pm 0,06 ab$	$2,00 \pm 0,07 a$

Nota. letras distintas implica diferencias significativas ($p \leq 0,5$). No presento efecto de historia previa.

5. DISCUSIÓN

A partir de los resultados surgen dos grandes ejes de análisis sobre el impacto de las tecnologías de manejo de suelos evaluadas: por un lado, los efectos sobre las propiedades del suelo, y por otro, su influencia en el rendimiento del cultivo.

5.1 Propiedades del suelo

5.1.1 Parámetros físicos y contenido de humedad

Los resultados obtenidos en este estudio mostraron valores de RP y DAp dentro de un rango que no afecta el crecimiento de las raíces, y sin efectos consistentes de los tratamientos, indicando una adecuada estructura física del suelo para el desarrollo radicular. En este ensayo el mayor valor de RP fue de 1107 kpa, en la segunda evaluación (24/01/24) a una profundidad de 30-45 cm, bajo LC (ver Anexo A). Este valor se encuentra por debajo del umbral crítico de 2000 kpa señalado en un estudio realizado en Santa María, Brasil, donde se establece que a partir de dicho umbral el crecimiento radicular de las plantas puede verse restringido (Reichert et al., 2003). Por lo tanto, no existen evidencias de que las condiciones físicas del suelo hayan limitado el desarrollo radicular ni el crecimiento del cultivo en las condiciones evaluadas.

Según investigaciones realizadas en Hungría en Institute for Process Engineering (Salman & Kiss, 2018), han comprobado que la interacción entre DAp y la humedad explica gran parte de la variabilidad en la RP. Parte de esta gran variabilidad encontrada podría atribuirse a diferencias en la humedad del suelo al momento de las mediciones, en particular durante la última evaluación, donde las temperaturas promedio del suelo fueron superiores a 23°C (Anexo E), lo cual podría estar favoreciendo una mayor evaporación. Sin embargo, la humedad reportada indicaba que el contenido de agua en el perfil (ver Anexo C) se mantuvo entre CC y PMP (25 %HV). Esta combinación de temperatura y humedad adecuada probablemente evitó que se alcanzara niveles de compactación o endurecimiento del suelo que incrementara la RP de forma marcada.

Según Salman y Kiss (2018) la RP aumenta con la densidad y disminuye con el contenido de humedad, debido a que el agua actúa como lubricante entre las partículas del suelo, reduciendo la fricción y la cohesión. Los resultados de esta investigación muestran que la DAp se mantuvo constante. En cambio, la humedad presentó variaciones que podrían explicar las diferencias observadas entre fechas, ya que en la segunda fecha, donde el tenía menor contenido de humedad, los valores fueron mayores en general.

En una investigación realizada por Alliaume et al. (2014), no se encontraron variaciones en RP ni DAp con LR a distinta densidad de CC. Si bien el LR puede generar incrementos localizados en RP superficial, especialmente en evaluaciones de corto plazo y en suelos pobres de estructura (Peigné et al., 2007), la situación de partida del área de estudio (5% de MOS), posiblemente mitigó los efectos sobre las propiedades físicas. Con relación a la DAp, esta ausencia de diferencias podría explicarse por el corto período de evaluación, limitado a un único ciclo de cultivo, lo que probablemente no fue suficiente

para que los tratamientos ejercieran un efecto acumulativo sobre las propiedades físicas del suelo.

Estudios previos, como el de Arboleya et al. (2012), reportan la ausencia de diferencias estadísticas en DAp tras cinco años de rotación hortícola, con un laboreo anual, con valores entre 0,89 - 1,27 g/cm³, considerándose adecuada para el buen crecimiento de las plantas. Sin embargo, un estudio realizado por Scarlato et al. (2024), en el mismo cuadro experimental que el presente trabajo, reportó que los tratamientos con LR tuvieron menor DAp que aquellos con LC, encontrándose dentro de los niveles adecuados para un correcto desarrollo radicular.

En nuestro trabajo y en el período corto evaluado, es posible que la historia de manejo agroecológico del suelo, al evitar el uso intensivo de maquinaria, mantener una cobertura permanente y agregado de enmienda orgánica, haya favorecido la estabilidad estructural del suelo, limitando procesos de compactación y manteniendo condiciones físicas favorables en todos los tratamientos.

Si bien el contenido de humedad de los tratamientos presentó variación (Ver anexo C), se mantuvo para todos, la mayor parte del tiempo entre capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP). A pesar de estas fluctuaciones, en el contenido de humedad no se evidenció efecto consistente en las propiedades físicas evaluadas. Por otro lado, los sensores estaban colocados a una profundidad de 10 cm, por lo que no se dispone de información sobre el contenido de agua en capas menos superficiales o más profundas del perfil. Cabe destacar que estas variaciones encontradas, podrían estar asociadas al volumen de mulch generado en superficie por el CC, como también la ubicación de los sensores, debido que fueron colocados en una zona del suelo que está más expuesta a pérdidas de agua por evaporación. La CC y el PMP fueron estimados teóricamente a partir de la textura y el contenido de MO mediante las ecuaciones propuestas por Fernández (1979, como se cita en Kaplán et al., 2015), por lo que las estimaciones podrían no reflejar con exactitud las condiciones reales de los camellones. Aun así, el tratamiento que presentó condiciones de mayor confort hídrico fue el LR-D2+M, de acuerdo con el cálculo de agua fácilmente aprovechable (AFA), realizado según Allen et al. (1998), lo que resultó bastante coherente con su efecto esperando en la reducción de la evaporación y conservación de la humedad. No obstante, la ausencia de efecto en el rendimiento podría sugerir que estas variaciones en la humedad superficial no se traducen en restricción para el cultivo, probablemente debido a que el cultivo zapallo calabacín se caracteriza por un sistema radical profundo, capaz de explorar estratos más profundos suelo, más allá del nivel donde fueron colocados los sensores de humedad.

5.1.2 Parámetros químicos y biológicos

La RB y PMN presentaron diferencias entre fechas y tratamientos, lo que refleja variaciones en la actividad global de la comunidad microbiana heterótrofa. En este sentido, Fierer (2017) destaca que la gran mayoría de las bacterias heterotróficas activas

en el suelo podrían contribuir potencialmente a las tasas de catabolismo del carbono orgánico o a la mineralización del nitrógeno. Esto implica que la RB y el PMN son indicadores de la actividad metabólica global más que de un grupo funcional específico. Así, las diferencias observadas podrían atribuirse al funcionamiento conjunto de la comunidad microbiana bajo determinada condición de manejo del suelo. Los resultados indicaron que en cuanto a RB y PMN hubo una respuesta diferencial de los tratamientos que estuvieron bajo CC respecto al tratamiento SD. En este sentido, un estudio realizado en INIA Las Brujas evidencia que la incorporación de residuos vegetales y enmiendas orgánicas promueve la actividad de los microorganismos heterótroficos, incrementando la disponibilidad de carbono y nitrógeno en el suelo, lo que podría generar mayor diversidad microbiana en los tratamientos orgánicos respecto al manejo convencional (Cerecetto et al., 2021); si bien en nuestro ensayo todos los tratamientos fueron sometidos a laboreo reducido y agregado de compost, el tratamiento SD no presentó CC. En cuanto al PN, proceso realizado exclusivamente por un grupo reducido de bacterias y arqueas aerobias, como, por ejemplo, Nitrosomonas y Nitrobacter (Dilly, 2006), mostró un comportamiento variable y sin tendencias muy marcadas entre fechas y tratamientos, lo que podría sugerir que el grupo de bacterias nitrificantes no estuvieron condicionadas a la disponibilidad de N y las condiciones ambientales (Oliveira et al., 2013).

En la primera evaluación, el mayor valor de RB como el de PMN se puede observar en el tratamiento D1, esto podría estar explicado porque en dos de los tres bloques, el tratamiento D1 quedó adyacente a la cortina de casuarinas, lo que pudo estar generando un “ruido” (menor viento, mayor humedad, sombra parcial y acumulación de mantillo extra), lo que podría estar favoreciendo microambientes más estables y con mayor disponibilidad de sustrato superficial. Esto se alinea con una observación de que la ubicación del tratamiento puede alterar la actividad microbiana y las tasas de mineralización, debido a que estos procesos están fuertemente relacionados con la humedad y la temperatura del suelo (Cerecetto et al., 2021). Dado que en ese momento no contábamos con sensores de humedad y temperatura, esta interpretación la consideramos cautelosa debido a que la actividad microbiana es muy compleja y dinámica. Se obtuvieron valores de PN contrastantes en los tratamientos D2 y D2 +M, sin embargo, en ese momento, estos no diferían entre sí y se encontraban con el CC a alta densidad, por lo que los resultados obtenidos no son congruentes. En este sentido, Fierer et al. (2021), destacan que los indicadores microbianos deben seleccionarse en función de los procesos específicos y del contexto del suelo. En suelos de textura fina y con alta heterogeneidad espacial, el PN puede no reflejar cambios funcionales derivados del manejo, ya que representa una capacidad potencial bajo condiciones controladas y no necesariamente la actividad efectiva en campo.

En cuanto a los parámetros químicos, estos fueron evaluados por primera vez el 20/10/23, en esta evaluación no se contaba con los sensores de humedad y temperatura instalados, pero ajustándose al momento del año y a las observaciones a campo, pudimos apreciar una rápida descomposición de los residuos de lupino que podría atribuirse, por un lado, a su elevada calidad bioquímica, caracterizada por un bajo contenido de lignina,

alta concentración de nitrógeno y una relación C/N reducida, lo que favorece su descomposición temprana (Muschietti Piana et al., 2021). Los factores ambientales sumado a la alta calidad del lupino podrían haber favorecido la actividad microbiana y la nitrificación, resultando en un predominio de nitrato sobre amonio y esto podría estar indicando una liberación temprana de N hacia el sistema, facilitando su disponibilidad para el cultivo en etapas iniciales. Al momento del acamado del CC se cuantificó un aporte de lupino de 0,7 y 0,6 Mg MS/ha de los tratamientos D1 y D2+M respectivamente, en tanto que D2 presentó un aporte de 0,35 Mg MS/ha (Anexo F), estas diferencias podrían estar explicando el contenido menor de N mineral en D2 de este análisis.

En lo que respecta a la segunda evaluación realizada el mes de noviembre, durante pleno desarrollo del cultivo comercial, se obtuvieron los valores más elevados de N mineral, con un marcado predominio de amonio, especialmente en los tratamientos con mayor aporte de biomasa (D2 y D2+M). Esta mayor acumulación coincide con una etapa de incremento de temperatura (Anexo G) y probablemente con una humedad adecuada, debido a que se contaba con un sistema de riego, condiciones que probablemente estimularon la actividad microbiana y, como consecuencia, se produjo una mayor liberación de amonio a partir de la descomposición de los residuos. Esta acumulación transitoria de amonio en nuestro ensayo está alineada con lo hallado por Trinsoutrot et al. (2000), donde destacaron que especies con baja relación C/N (Anexo F) se mineralizan rápidamente, favoreciendo la disponibilidad de formas inorgánicas de nitrógeno. En cuanto a la RB (Ver figura 8) no se encontró efecto entre tratamientos; sin embargo, el valor más alto correspondió al SD, a pesar de estar instalado el cultivo comercial, el porcentaje de cobertura era de un 36% (Ver anexo H), dado que el muestreo se realizó en primavera, donde se dan incrementos de temperatura (Anexo G), es esperable que la temperatura del suelo también aumente. Como sugiere Paulus et al., (2024), los suelos sin cobertura se calientan más que los suelos que presentan una cobertura orgánica, lo cual podría explicar un incremento en la actividad microbiana global en ese momento en el tratamiento SD respecto a los demás. En este sentido, Fierer (2017) señala la temperatura como un regulador clave que estimula la actividad microbiana y la respiración. Además, se puede apreciar que todos los tratamientos se comportaron de forma similar, pudiendo atribuirse a factores edáficos como climáticos que terminaron favoreciendo una actividad heterotrófica alta en todos los tratamientos. En cuanto al tratamiento D2+M, se evidenció que la amonificación superó la nitrificación, favoreciendo la acumulación transitoria de amonio. Pese a que tanto la amonificación como la nitrificación son procesos que se podrían ver favorecidos con el incremento de temperatura en combinación con una adecuada humedad, las bacterias que realizan el proceso de nitrificación son más sensibles a pequeños cambios en el ambiente como son la oxigenación. Esta condición puede generar un desbalance temporal entre ambos procesos, favoreciendo la amonificación y provocando una acumulación transitoria de amonio (Hu et al., 2023). Este hecho también fue señalado por Sahrawat (2008), quien observó que la actividad de las bacterias nitrificantes se restringe cuando disminuye la disponibilidad de oxígeno, situación que podría ocurrir en microambientes poco aireados generados bajo el mulch grueso, característico de tratamientos como los realizados en nuestro ensayo.

La tercera evaluación, realizada en el mes de enero, donde por lo general se dan condiciones más limitantes para la actividad microbiana, evidenció un claro efecto de los tratamientos con CC de mayor densidad sobre el suelo, sustentado por mayores valores de RB y PMN, en D2 y D2+M. A su vez, si bien el N mineral presentó una reducción importante en todos los tratamientos, los tratamientos D2 y D2+M tuvieron los contenidos de amonio más altos en el suelo. En D2 y D2+M las condiciones de temperaturas de suelo más frescas y mayores contenidos de humedad de suelo, explicaría las mejores condiciones para la actividad microbiana. El menor nivel general del N mineral se justifica debido a la etapa fisiológica del cultivo y la extracción de nutrientes realizada. A su vez, esta menor disponibilidad de N mineral, también podría estar relacionada a factores edáficos, ambientales y a una mayor absorción de N en la biomasa microbiana. Durante este periodo las temperaturas de suelo registradas estuvieron en un rango de 23- 27°C, presentando SD mayor amplitud térmica (Anexo E) y se registró una disminución en la humedad del suelo, llegando a valores próximos a PMP en los tratamientos SD y D2 (Anexo C), esto podría haber afectado la actividad microbiana responsable de los procesos de mineralización y nitrificación. Si bien las diferencias en el contenido de N mineral entre tratamientos no fueron significativas, los tratamientos D2 y D2+M fueron los que mantuvieron los valores más altos, predominando la fracción amoniacal sobre la nítrica, lo que podría estar sugiriendo una posible limitación en el proceso de nitrificación hacia el final del ciclo (Oliveira et al., 2013).

5.2 Rendimiento del cultivo de calabacín

5.2.1 Crecimiento y desarrollo del cultivo

El número total de hojas mostró diferencias tanto entre tratamientos como entre historia de manejo previo. En LR como LC, el SD fue el que presentó el mayor número de hojas por planta respecto a los tratamientos D1, D2 y D2+M, lo que sugiere que en la etapa inicial del cultivo el SD podría haber presentado un calentamiento más acelerado del suelo respecto a los suelos con cobertura, llevando a un mayor desarrollo de follaje. Esto se alinea con lo hallado en un estudio realizado en Ontario, Canadá, donde observaron que la temperatura de primavera era entre 0,1 a 3°C más altas en el suelo desnudo (Yang et al., 2021). Desde que se comenzó a registrar la temperatura del suelo, el tratamiento SD presentó mayor temperatura promedio que los demás tratamientos particularmente en el mes de noviembre y enero (entre 1 y 4 °C superior según tratamiento y fecha), a su vez, la amplitud térmica en SD también fue mayor (anexo D).

En cuanto a la biomasa acumulada a los 57 dpt, se observaron algunas diferencias entre historia de manejo, donde se observó que en LC-SD fue el que presentó mayores valores, pudiéndose explicar por una mayor temperatura de suelo, lo que generaría un ambiente más favorable para el desarrollo a inicios del cultivo comercial. Por otra parte, el IAF, no mostró diferencias estadísticas. Esto podría estar explicado por un comportamiento compensatorio entre los tratamientos con menor número de plantas, como ocurrió en SD donde se registró una mayor pérdida de plantas, estas podrían haber

alcanzado un mayor tamaño individual, mientras que aquellos con mayor número de plantas, el crecimiento fue menor, equilibrando el IAF. El contenido del N foliar presentó una interacción entre historia de manejo y los tratamientos actuales, sin embargo, dentro de cada historia no se observó diferencias estadísticas, lo cual se explica por la alta variabilidad de datos. Los valores promedios oscilaron entre 4 y 4,8% (Anexo J), en el rango de los umbrales críticos reportados para la especie de 4,15 – 4,45% (Huett & White, 1991). Esto indica que el cultivo tuvo niveles adecuados de N foliar, sin mostrar deficiencias nutricionales marcas que puedan haber limitado el crecimiento o el rendimiento del cultivo en ninguno de los tratamientos.

5.2.2 Componentes del rendimiento

En cuanto al rendimiento total, el promedio de zapallo calabacín alcanzó 47 Mg/ha, sin diferencias entre tratamiento. El rendimiento comercial fue similar al rendimiento total, debido a que el porcentaje de descarte fue bajo en todos los tratamientos (< 2 %), el motivo de dicho descarte fue por rajado y podredumbre blanda. Este porcentaje bajo de pérdidas podría estar explicado por el mulch que generó el CC y el mulch extra, lo que evitó que el fruto quedara en contacto directo con el suelo, reduciendo la posibilidad de la entrada de patógenos del suelo, junto con contenidos de humedad en la superficie del suelo (0-10 cm) por debajo de CC. Por otra parte, el riego adecuado, proporcionó al cultivo condiciones para un óptimo crecimiento, evitando fluctuaciones bruscas en la disponibilidad de agua, pudiendo reducir la ocurrencia de rajado. Dicho rendimiento supera lo obtenido en un ensayo de Della Gaspera y Rodríguez (2013), de 35 Mg/ha, quienes además destacan que la utilización de mulching, con un manejo adecuado del riego, contribuyen a mejorar la temperatura del suelo, reducir las pérdidas por pudriciones y aumentar el rendimiento (Della Gaspera & Rodríguez, 2013).

A pesar de que la cosecha fue realizada de manera anticipada, la proporción de frutos verdes remanentes fue baja (7,8 % de los frutos totales), sin encontrarse efecto entre tratamiento. Este resultado podría evidenciar que incluso bajo esquemas de manejo conservacionista del suelo y sin el agregado de insumos externos de síntesis química, es posible alcanzar e incluso superar los rendimientos comúnmente reportados para las condiciones locales que se sitúan entre los 20 y 30 Mg/ha (Aldabe Dini, 2000). Más aún si se considera información más reciente (DIEA, 2023), donde se reportan rendimientos promedios más bajos aún, de 13 Mg/ha.

Cabe destacar que los rendimientos elevados que se obtuvieron, también pueden estar explicados por los valores N mineral observados a lo largo del ciclo de cultivo. El N mineral fue elevado en todo el ciclo del cultivo, cuando se realizó el análisis foliar los valores obtenidos estuvieron próximos al umbral crítico (ver punto 5.2.1), lo que indicó una nutrición nitrogenada adecuada. Sin embargo, se presentó un pico de N mineral el 13/11/23, coincidiendo con la floración/cuajado del cultivo y el inicio de crecimiento de los frutos. Ese máximo de N mineral en suelo fue determinado por la fracción amoniacal con un máximo de 55 ppm de NH_4^+ , sumando al NO_3^- con 30 ppm (ver Figura 6). A su vez, hacia el final del ciclo del cultivo los valores de N mineral descendieron,

coincidiendo con la menor demanda del cultivo. Cabe destacar que cuando las concentraciones de N mineral oscilaron entre 70-80 ppm (ver Figura 6), esto equivaldría aproximadamente entre unos 175 y 200 kg N/ha. A partir del rendimiento obtenido, se estima la absorción potencial de nitrógeno por el cultivo, que equivaldría a 188 kg N/ha, asumiendo una extracción de 4 kg N por tonelada de fruto (Ciampitti & García, 2007). En consecuencia, la disponibilidad de N en el suelo resultó próxima a la cantidad requerida por el cultivo, lo que explicaría la ausencia de restricciones por deficiencia de este nutriente. La coincidencia entre el pico de N disponible y la etapa de mayor demanda del cultivo fue determinante para sostener la productividad alcanzada.

Otro factor relevante para la obtención de un buen rendimiento en el cultivo de zapallo calabacín es la polinización. Se estima que tuvo inicio a mediados del mes de septiembre, coincidiendo con un periodo de condiciones climáticas favorables para la polinización. Teniendo en cuenta la base de datos de la estación meteorológica INIA (s.f.), observamos que las temperaturas se mantuvieron por debajo del umbral crítico de 35°C (Anexo G), considerado como límite para la viabilidad de los granos de polen de las cucurbitáceas (Della Gaspera & Rodríguez, 2013), permitiendo una adecuada actividad de las abejas. A este factor se le suma las precipitaciones o días nublados, que pueden bajar la actividad de las abejas (Della Gaspera & Rodríguez, 2013). Los datos analizados (Anexo G) muestran que durante el período de floración y cuajado predominó un número adecuado de días soleados, favoreciendo así la polinización (INIA, s.f.). Una polinización eficiente es determinante para asegurar un buen cuajado y frutos de calidad, por lo tanto, temperaturas moderadas y baja ocurrencia de lluvias durante la floración puede haber favorecido la polinización y en consecuencia contribuido de manera importante al rendimiento.

5.2.3 Rendimiento Total

La densidad de plantas fue mayor en D2 y D2+M respecto a SD, a su vez, SD presentó mayor número de frutos por planta respecto a D2+M, resultados en un número de frutos por hectárea similar entre tratamientos. Se observó una tendencia compensatoria entre cantidad y tamaño de frutos: SD tuvo más frutos, pero de menor peso (1,53 kg), mientras que D2+M mostró menos frutos por de mayor tamaño (2 Kg) (ver tabla 9).

Este comportamiento refleja mecanismos compensatorios de la especie, entre el número de frutos y su peso individual, que contribuyeron a explicar la ausencia de efecto tratamiento en el rendimiento total.

6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se pudo observar que el LR, combinado con CC y mulching, constituyen una alternativa viable dentro de los sistemas hortícolas de base agroecológica en Uruguay. En el presente ensayo, testeando un CC mixto invernal y el cultivo de calabacín primavero-estival, y partiendo de un suelo con historia de manejo orgánico de varios años y antecedentes de LR, y contenido de MOS de 5%, fue posible alcanzar altos rendimientos y preservar la salud del suelo mediante el uso de CC-LR y mulching.

En estas condiciones, los resultados obtenidos en relación a los parámetros físicos evaluados (RP y DAp), demuestran que no hubo limitantes para el desarrollo radicular de los cultivos hortícolas, no encontrándose diferencias de las distintas densidades de siembra del CC y agregado de mulch extra en el período evaluado. Esto invita a seguir evaluando estas variables en el largo plazo, para evidenciar si se sigue manteniendo este patrón de comportamiento. Adicionalmente, estos resultados no deben extrapolarse a situaciones de suelos pobres de estructura o con bajo contenido de MOS, donde es necesario evaluar cómo se comportan estas variables.

En los sistemas hortícolas bajo manejo orgánico, una de las principales limitantes para la adopción de tecnologías como LR y el uso de CC es la disponibilidad de N. Dado que en estos sistemas no se aplica fertilizantes químicos, el N disponible para el cultivo proviene del compost incorporado al inicio del ciclo, y posteriormente, de la descomposición del CC. En este contexto, la elección de especies o mezcla del CC adquiere un papel importante, ya que influye directamente en la dinámica del nitrógeno del suelo. La utilización de CC puede ocasionar una inmovilización momentánea del N, debido que los microorganismos del suelo lo toman para aumentar su biomasa y así descomponer los residuos. Esto generaría una competencia por el nutriente con el cultivo comercial que los subsigue, en nuestra investigación no se evidenció un desajuste en la liberación de nutrientes por parte del CC hacia el sistema, principalmente en el momento de mayor demanda por parte del cultivo. En este sentido, la elección de la mezcla del CC con una relación C/N equilibrada, resulta fundamental para garantizar una liberación de nutrientes lenta pero sostenida en el tiempo, promoviendo una mejor eficiencia en el uso del nutriente en el sistema.

Otro de los aspectos a considerar es la terminación del CC, la técnica de rolado resultó efectiva, aunque se registró rebrotes de centeno, evidenciándose la necesidad de seguir investigando la fisiología y el comportamiento de esas especies en nuestras condiciones locales, fundamentalmente definir los momentos de terminación, especialmente cuando se utilizan mezclas. En nuestra investigación el lupino completó su ciclo y senesció naturalmente, sin interferir en el cultivo comercial. Su baja relación C/N y rápida descomposición promovieron una posible liberación temprana de N, evidenciada por los mayores niveles de N mineral durante la primavera, esto lo posiciona como una leguminosa promisoria para realizar las mezclas.

Creemos fundamental estudiar las densidades de siembra y los momentos del acamado para lograr maximizar los beneficios del CC, así como es importante hacer un seguimiento desde la implantación para evaluar con mayor precisión el aporte de biomasa y nutrientes de especies que presentan distintos ciclos dentro de la mezcla de CC. De este modo, la planificación del CC no solo debe orientarse a la cobertura física del suelo, sino también a su función como reservorio y fuente de nutrientes, en especial en sistemas de base agroecológica donde la fertilización depende en gran medida de los procesos biológicos internos del suelo. Además de analizar la biomasa aérea de los CC, consideramos interesante poder avanzar en el estudio de los aportes radiculares, que representan una fracción significativa de carbono y energía para la microbiota del suelo.

A su vez, consideramos relevante el desarrollo de maquinaria compatible con estas tecnologías y ajustada a las particularidades del sistema, con el fin de optimizar los tiempos operativos y mejorar la eficiencia global del manejo. En el caso de los cultivos establecidos en canteros, se vuelve especialmente necesaria la generación de implementos específicos que permitan un rolado efectivo tanto en la superficie superior como en los laterales del cantero, superando las limitaciones de los equipos diseñados para superficies planas. La disponibilidad de maquinaria adaptada a esta configuración contribuiría de manera significativa a la adecuada implementación y escalabilidad de estas prácticas en sistemas hortícolas intensivos.

En cuanto a los indicadores biológicos analizados, pudimos comprobar que los tratamientos con residuos en superficie, reportaron los mayores niveles de respiración y de PMN. En el mes de enero, período de altas temperaturas, considerado en oportunidades limitante para el desarrollo de la comunidad microbiana, se logró evidenciar que, en los tratamientos con mayor cantidad de residuos en superficie, se presentó mayor actividad microbiana global, probablemente debido a las condiciones de temperatura y humedad que se genera al mantener el suelo cubierto. Esto destaca que mantener el suelo con residuos fomenta la actividad microbiana y mejora la salud del suelo. Por otra parte, el PN, no se comportó como un indicador sensible para diferenciar los efectos del manejo, esto podría estar explicando por la gran variabilidad temporal de los procesos que intervienen en el ciclo del N. Este resultado evidencia que es muy complejo monitorear variables biológicas, debido a que no captan variaciones temporales cortas, por lo que sería interesante explorar otros indicadores complementarios para medir la actividad microbiana o aumentar la frecuencia de los muestreos, con el fin de obtener una visión más completa de los procesos que van ocurriendo en el suelo en el transcurso del CC y el posterior cultivo comercial.

En cuanto al cultivo de calabacín, se alcanzaron rendimientos comerciales muy altos, sin diferencia significativa entre tratamientos, aunque con variaciones en los componentes del rendimiento, que evidencian los mecanismos compensatorios de la especie. Los niveles de nitrógeno disponible en los momentos críticos del cultivo, sumado a condiciones ambientales favorables para la polinización, contribuyeron a explicar estos altos rendimientos, comparables e incluso superiores a los reportados en sistemas convencionales.

Si bien se observaron diferencias en la humedad superficial entre los tratamientos, estas no se tradujeron en variaciones significativas en el rendimiento del cultivo. La presencia de mulch favoreció una mayor conservación del agua. En este sentido, sería recomendable que en futuras evaluaciones se incorporen sensores de humedad a distintas profundidades, a fin de obtener una comprensión más integral del comportamiento del agua en el sistema. Cabe destacar que el riego se aplicó al 80 % de las necesidades hídricas estimadas, pero no se detectaron diferencias significativas entre tratamientos en el rendimiento ni en el porcentaje de frutos rajados. Este resultado sugiere que el volumen de riego aplicado podría haber sido superior al requerido, lo cual pone de manifiesto la necesidad de ajustar las dosis de riego en condiciones de incorporación adicional de mulch. En este contexto, la posibilidad de reducir el uso de agua sin afectar la productividad constituye un aporte relevante frente a los desafíos que impone el contexto actual de cambio climático.

En este sentido, los resultados obtenidos sugieren que las prácticas de CC-LR y uso de mulch, constituyen herramientas viables para los sistemas de producción intensiva con manejo orgánico-agroecológico. Al mismo tiempo que aportan evidencia concreta para avanzar en el diseño de sistemas hortícolas más sostenibles, fortaleciendo los procesos de transición agroecológica y reafirmando el potencial de producir sin el uso de insumos químicos, sin comprometer -e incluso potenciando- la productividad. De este modo, se promueve una producción que cuida el ambiente y la salud, al tiempo que garantiza la obtención de alimentos inocuos y de calidad.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdul-Baki, A. A., & Teasdale, J. R. (2007). *Sustainable production of fresh-market tomatoes and other vegetables with cover crop mulches*. USDA.
- Ackermann, M. N., & Díaz, A. (2016). Horticultura: Situación y perspectivas. En *Anuario OPYPA 2016* (pp. 229-246). MGAP.
https://descargas.mgap.gub.uy/OPYPA/Anuarios/Anuario%202016/anuario_opypa_2016_en_baja.pdf
- Agüerre, V., Chilibroste, P., Casagrande, M., & Dogliotti, S. (2014). Exploración de alternativas para el desarrollo sostenible de sistemas de producción hortícola-ganaderos familiares en el sur de Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*, 18(1), 24-40. <https://doi.org/10.31285/AGRO.26.1098>
- Aldabe Dini, L. (2000). *Producción de hortalizas en Uruguay*. Epsilon.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO.
- Alliaume, F., Rossing, W. A. H., García, M., Giller, K. E., & Dogliotti, S. (2013). Changes in soil quality and plant available water capacity following systems redesign on commercial vegetable farms. *European Journal of Agronomy*, 46, 10-19. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.11.005>
- Alliaume, F., Rossing, W. A. H., Tittonell, P., & Dogliotti, S. (2017). Modelling soil tillage and mulching effects on soil water dynamics in raised-bed vegetable rotations. *European Journal of Agronomy*, 82(Part B), 268-281.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.08.011>
- Alliaume, F., Rossing, W. A. H., Tittonell, P., Jorge, G., & Dogliotti, S. (2014). Reduced tillage and cover crops improve water capture and reduce erosion of fine textured soils in raised bed tomato systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 183, 127-137. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.11.001>
- Alptekin, H., & Gürbüz, R. (2022). The effect of organic mulch materials on weed control in cucumber (*Cucumis sativus* L.) cultivation. *Journal of Agriculture*, 5(1), 68-79. <https://doi.org/10.46876/ja.1126331>
- Amado, T. J. C., Mielniczuk, J., & Aita, C. (2002). Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 26(1), 241-248. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000100025>
- Angers, D. A., Edwards, L. M., Sanderson, J. B., & Bissonnette, N. (1999). Soil organic matter quality and aggregate stability under eight potato cropping sequences in a fine sandy loam of Prince Edward Island. *Canadian Journal of Soil Science*, 79(3), 411-417. <https://doi.org/10.4141/S98-033>
- Angon, P. B., Anjum, N., Akter, M. M., Shreejana, K. C., Suma, R. P., & Jannat, S. (2023). An overview of the impact of tillage and cropping systems on soil health in agricultural practices. *Advances in Agriculture*, 2023(1), Artículo e8861216.
<https://doi.org/10.1155/2023/8861216>

- Arboleya, J., Gilsanz, J. C., Alliaume, F., Leoni, C., Falero, M., & Guerra, S. (2010). Manejo sustentable en la producción hortícola intensiva. En R. Docampo (Ed.), *Seminario de actualización técnica: Manejo de suelos para producción hortícola sustentable* (pp. 9-20). INIA.
- Arboleya, J., Gilsanz, J. C., Alliaume, F., Leoni, C., Falero, M., & Guerra, S. (2012). Minimum tillage and vegetable crop rotation. *Agrociencia (Uruguay)*, 16(3), 62-70. <https://doi.org/10.31285/AGRO.16.647>
- Blake, G. R., & Hartge, K. H., (1986). Bulk density. En A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis, part 1: Physical and mineralogical methods* (2nd ed., pp. 363-375). ASA; SSSA. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c13>
- Bowman, G., Shirley, C., & Cramer, C. (1998). *Managing cover crops profitably* (2nd ed.). Sustainable Agriculture Network.
https://efotg.sc.egov.usda.gov/references/Delete/2011-5-21/Archived_covercrops_110509.pdf
- Bray, R. H., & Kurtz, L. T. (1945). Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*, 59(1), 39-46.
<http://dx.doi.org/10.1097/00010694-194501000-00006>
- Brooks, M. E., Kristensen, K., Van Benthem, K. J., Magnusson, A., Berg, C. W., Nielsen, A., Skaug, H. J., Mächler, M., & Bolker, B. M. (2017). glmmTMB Balances Speed and Flexibility Among Packages for Zero-inflated Generalized Linear Mixed Modeling. *The R Journal*, 9(2), 378-400. <https://journal.r-project.org/archive/2017/RJ-2017-066/RJ-2017-066.pdf>
- Carámbula, M. (2007). *Verdeos de invierno*. Hemisferio Sur.
- Carr, P. M., Gramig, G. G., & Liebig, M. A. (2013). Impacts of organic zero tillage systems on crops, weeds, and soil quality. *Sustainability*, 5(7), 3172-3201. <https://doi.org/10.3390/su5073172>
- Castaño, J. P., Cerón Acosta, M., Giménez, A., Furest, J., & Aunchayna, R. (2011). *Caracterización agroclimática del Uruguay: 1980-2009*. INIA.
- Castellano-Hinojosa, A., Nevins, C. J., & Strauss, S. L. (2021). Influence of cover crops on nitrogen cycling and the soil microbial community. En J. González-López & A. González-Martínez (Eds.), *Nitrogen cycle: Ecology, biotechnological applications and environmental impacts* (pp. 264-283). CRS Press.
<https://doi.org/10.1201/9780429291180>
- Castro Luna, I., & Esono Ndong, A. (2001). *Efecto de dos métodos de laboreo sobre las propiedades físicas del suelo y el desarrollo del girasol (Helianthus annuus)*. CSIC-IRNAS. <https://core.ac.uk/reader/45452036>
- Cerecetto, V., Smalla, K., Nesme, J., Garaycochea, S., Fresia, P., Johannes Sørensen, S., Babin, D., & Leoni, C. (2021). Reduced tillage, cover crops and organic amendments affect soil microbiota and improve soil health in Uruguayan vegetable farming systems. *FEMS Microbiology Ecology*, 97(3), Artículo fiab023. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiab023>

- Cerón Rincón, L. E., & Aristizábal Gutiérrez, F. A. (2012). Dinámica del ciclo de nitrógeno y fósforo en suelos. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 14(1), 285-295. <https://www.redalyc.org/pdf/776/77624081026.pdf>
- Chavarría, D. N., Verdenelli, R. A., Muñoz, E. J. Conforto, C., Restovich, S. B., Andriulo, A. E., Meriles, J. M., & Vargas-Gil, S. (2016). Soil microbial functionality in response to the inclusion of cover crop mixtures in agricultural systems. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 14(2), Artículo e0304. <http://dx.doi.org/10.5424/sjar/2016142-8395>
- Ciampitti, I. A., & García, F. O. (2007). *Requerimientos nutricionales: Absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios: II Hortalizas, frutales y forrajeras*. IPNI.
- Colnago, P., Favretto, G., Carriquiry, M. E., Bianco, M., Carámbula, M., Cabrera, G., Rossing, W. A. H., & Dogliotti, S. (2023). How to foster changes towards farm sustainability? Learning outcomes from a co-innovation project on vegetable-beef cattle family farms in Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 27, Artículo e1012. <https://doi.org/10.31285/AGRO.27.1012>
- Dai, Z., Fan, J., Wei, F., Niu, X., Yang, Q., & Hao, M. (2024). Changes in soil microbial community and co-occurrence network after long-term no-tillage and mulching in dryland farming. *Plant and Soil*, 495, 201-220. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06315-w>
- Della Gaspera, P., & Rodríguez, R. A. (2013). El género cucurbita. En P. Della Gaspera (Ed.), *Manual del cultivo del zapallo anquito (Cucurbita moschata Duch.)* (pp. 9-24). INTA. https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/109969/CONICET_Digital_Nro.e66f2d8d-f6b4-4ed8-86ee-57a54d2e75f1_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- De Souza, A. P., Da Silva, A. C., Pizzatto, M., & De Souza, M. (2017). Thermal Requirements and productivity of squash (*Cucurbita moschata* Duch.) in the Cerrado-Amazon transition. *Agrociencia (Uruguay)*, 21(2), 15-22. <http://www.scielo.edu.uy/pdf/agro/v21n2/2301-1548-agro-21-02-00015.pdf>
- Dilly, O. (2006). Estimating soil microbial activity. En R. Burns, P. Nannipieri, A. Benedetti, & W. Hopkins (Eds.), *Microbiological methods for assessing soil quality* (pp. 114-116). CABI Publishing.
- Docampo, R. (2012). La importancia de la materia orgánica del suelo y su manejo en producción frutícola. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.) *Seminario de actualización técnica: Frutales de pepita* (pp. 81–88). <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/11480/1/sad-687-p.81-88.pdf>
- Dogliotti, S., Abedala, C., Aguerre, V., Albín, A., Alliaume, F., Alvarez, J., Bacigalupe, G. F., Barreto, M. Chiappe, M., Corral, J., Dieste, J. P., García de Souza, M. C., Guerra, S., Leoni, C., Malán, I., Mancassola, V., Pedemonte, A., Peluffo, S., Pombo, C., ... Scarlato, M. (2012). *Desarrollo sostenible de sistemas de producción hortícolas y hortícola-ganaderos familiares: Una experiencia de co-innovación*. INIA.

- Dogliotti, S., Rossing, W. A. H., & Van Ittersum, M. K. (2004). Systematic design and evaluation of crop rotations enhancing soil conservation, soil fertility and farm income: A case study for vegetable farms in South Uruguay. *Agricultural Systems*, 80(3), 277-302. <https://doi.org/10.1016/j.agsty.2003.08.001>
- Duppong, L. M., Delate, K., Liebman, M., Horton, R., Romero, F., Kraus, G., Petrich, J., & Chowdbury, P. K. (2004). The effect of natural mulches on crop performance, weed suppression and biochemical constituents of catnip and St. John's wort. *Crop Science*, 44(3), 861-869. <https://doi.org/10.2135/cropsci2004.8610>
- Echever, D. (2023). *Evaluación de la microbiota de suelo en cultivo de arándanos, bajo diversas coberturas de superficie* [Trabajo final de grado, Universidad Nacional de La Plata]. SEDICI. https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/154313/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Fang, H., Baret, F., Plummer, S., & Schaepman-Strub, G. (2019). An overview of global Leaf Area Index (LAI): Methods, products, validation, and applications. *Reviews of Geophysics*, 57(3), 739-799. <https://doi.org/10.1029/2018RG000608>
- Fierer, N. (2017). Embracing the unknown: Disentangling the complexities of the soil microbiome. *Nature Reviews Microbiology*, 15, 579-590. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.87>
- Fierer, N., Wood, S. A., Bueno de Mesquita, C. P. (2021). How microbes can, and cannot, be used to assess soil health. *Soil Biology and Biochemistry*, 153, Artículo e108111. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.108111>
- Fornaris Rullán, G. J. (2012). *Conjunto tecnológico para la producción de calabaza: Características de la planta*. Universidad de Puerto Rico. <https://www.uprm.edu/eea/wp-content/uploads/sites/177/2016/04/2.CALABAZA-CARACTERISTICAS-DE-LA-PLANTA.pdf>
- Frasier, I., Quiroga, A., & Noellemyer, E. (2016). Effect of different cover crops on C and N cycling in sorghum NT systems. *Science of the Total Environment*, 562, 628-639. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.058>
- Frutos, V., Pérez, M., & Risco, D. (2016). Efecto de diferentes mulches orgánicos sobre el cultivo de brócoli (*Brassica oleracea* L. var. *Italica*) en Ecuador. *Idesia (Arica)*, 34(6), 61-66. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292016005000038>
- García de Souza M., & Alliaume, F. (2010). Manejo sustentable de suelos en sistemas de producción hortícola del sur del Uruguay. En R. Docampo (Ed.), *Seminario de actualización técnica: Manejo de suelos para producción hortícola sustentable* (pp. 69-79). INIA.
- García de Souza, M., Alliaume, F., Mancassola, V., & Dogliotti, S. (2011). Carbono orgánico y propiedades físicas del suelo en predios hortícolas del sur de Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*, 15(1), 70-81. <https://doi.org/10.31285/AGRO.15.613>

- García Préchac, F., & Clérici, C. (1996). Erosión del suelo: Predicción y control. En A. Morón, D. Martino, & J. Sawchik (Eds.), *Manejo y fertilidad de suelos* (pp. 149-155). INIA. <https://inia.uy/sites/default/files/publications/2025-03/st-76-1996.pdf>
- Gilsanz, J. C. (2012). *Abonos verdes en la producción hortícola: Usos y manejo*. INIA. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2548/1/18429180912091518.pdf>
- Gilsanz, J. C., & Arboleya, J. (2006). Mínimo laboreo en la producción hortícola. *Revista INIA*, (6), 22-25. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/793/1/111219220807161805.pdf>
- Gómez-Calderón, N., Villagra-Mendoza, K., & Solorzano-Quintana, M. (2018). La labranza mecanizada y su impacto en la conservación del suelo (revisión literaria). *Tecnología en Marcha*, 31(1), 167-177. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7438122.pdf>
- Hartig, F. (2024, 17 de octubre). *DHARMA: Residual diagnostics for hierarchical (multi-level/mixed) regression models*. <https://cran.r-project.org/web/packages/DHARMA/vignettes/DHARMA.html>
- Hoffmann, H., Schloter, M., & Wilke, B. M. (2007). Microscale-scale measurement of potential nitrification rates of soil aggregates. *Biology and Fertility of Soils*, 44(2), 411-413.
- Hu, J., Du, M., Chen, J., Tie, L., Zhou, S., Buckeridge, K. M., Cornelissen, J. H. C., Huang, C., & Kuzyakov, Y. (2023). Microbial necromass under global change and implications for soil organic matter. *Global Change Biology*, 29(12), 3503-3515. <https://doi.org/10.1111/gcb.16676>
- Huett, D. O., & White, E. (1991). Determination of critical nitrogen concentrations of zucchini squash (*Cucurbita pepo* L.) cv. Blackjack grown in sand culture. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 31, 835-842.
- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. (s.f.). *Banco de datos agroclimáticos*. <https://www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>
- Isaac, R. A., & Kerber, J. D. (1971). Atomic absorption and flame photometry: Techniques and uses in soil, plant and water analysis. En L. M. Walsh (Ed.), *Instrumental Methods for analysis of soil and plant tissue* (pp. 17-37). SSSA. <https://doi.org/10.2136/1971.instrumentalmethods.c2>
- IUSS Working Group WRB. (2006). *World reference base for soil resources 2006: A framework for international classification, correlation and communication*. FAO. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/1bd0747c-e9d8-4b28-99bf-55684d121e38/content>
- Kaplán, A., Labella, S., Rucks, L., & Durán, A. (2015). *Manual para la descripción e interpretación del perfil del suelo*. Universidad de la República.
- Lenth, R. V. (2016). Least-squares means: The R package lsmeans. *Journal of Statistical Software*, 69(1), 1-33. <https://doi.org/10.18637/jss.v069.i01>

- Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. (s.f.). *Carta de erosión antrópica Uruguay.*
https://descargas.mgap.gub.uy/DGRN/Comunicaciones/EROSION_ANTROPICA_Intensidad_del_proceso_erosivp.jpg
- Mulvaney, R. L. (1996). Nitrogen: Inorganic forms. En D. L. Sparks, A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Loepert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Johnston, & M. E. Sumner (Eds.), *Methods of soil analysis: Part 3. Chemical methods* (pp. 1123-1184). SSSA. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c38>
- Murphy, J., & Riley, J. P. (1962). A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27, 31-36.
[https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)88444-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5)
- Muschietti Piana, P., McBeath, T. M., McNeill, A. M., Cipriotti, P. A., & Gupta, V. (2021). Increases in potentially mineralizable and dissolved organic nitrogen in a sandy surface soil fertilized with nitrogen are greater with lupin than wheat residues. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21, 2918-2931.
<https://doi.org/10.1007/s42729-021-00578-x>
- Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. En D. L. Sparks, A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Loepert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Johnston & M. E. Sumner (Eds.), *Methods of soil analysis: Part 3. Chemical methods* (pp. 961-1010). SSSA.
- Observatorio Granjero. (s.f.). *Manual de procedimientos y referencias técnicas: Para la tipificación de la calidad de frutas y hortalizas frescas*. MGAP.
<https://es.scribd.com/document/475315286/Manual-de-Procedimientos-Observatorio-Granjero#>
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2023). *Anuario estadístico agropecuario 2023*. MGAP.
<https://descargas.mgap.gub.uy/DIEA/Anuarios/Anuario2023/ANUARIO2023WEB.pdf>
- Öhlinger, R., Beck, T., Heilmann, B., & Beese, F. (1996). Soil respiration. En F. Schinner, R. Öhlinger, E. Kandeler, & R. Margesin (Eds.), *Methods in soil biology* (pp. 93-110). Springer.
- Oliveira, A. C. D. G., Blaich, C. I., Lopes, D. D., Santana, S. V., & Prates, K. (2013). NMP de bactérias nitrificantes e desnitrificantes e sua relação com os parâmetros físico-químicos em lodo ativado para remoção biológica de nitrogênio de lixiviado de aterro sanitário. *Revista DAE*, (192), 60-69.
https://www.revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_192_n_1492.pdf
- Paulus, D., Minatti, L., de França, D., & Becker, D. (2024). Produtividade e qualidade de frutos de pepino com bioativador de solo e mulching orgânico. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, 17(3), Artícuo e12402.
<https://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/rama/article/download/12402/7849/74714>

- Peigné, J., Ball, B. C., Roger-Estrade, J., & David, C. (2007). Is conservation tillage suitable for organic farming?: A review. *Soil Use and Management*, 23(2), 129-144. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2006.00082.x>
- Perdomo, C., & Barbazán, M. (2013). *Nitrógeno*. Universidad de la República.
- Ponce, J. P., Siliquini, Ó. A., & Fernández, R. (2020). Cultivos de cobertura como antecesor de zapallo anco en la región semiárida pampeana. *Semiárida*, 30(2), 51-61. [https://doi.org/10.19137/semiarida.2020\(02\).51-61](https://doi.org/10.19137/semiarida.2020(02).51-61)
- Ramos, S. R. R., Lima, N. R. S., Dos Anjos, J. L., De Carvalho, H. W. L., De Oliveira, I. R., Sobral, L. F., & Curado, F. F. (2010). *Aspectos técnicos do cultivo da abóbora na região Nordeste do Brasil*. Embrapa. http://www.cpatc.embrapa.br/publicacoes_2010/doc_154.pdf
- Reichert, J. M., Reinert, D. J., & Braida, J. A. (2003). Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ciência & Ambiente*, 27, 29-48. https://www.fisicadosolo.ccr.ufsm.quoos.com.br/downloads/Producao_Artigos/5.pdf
- 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>
- Rhine, E. D., Sims, G. H., Mulvaney, R. L., & Pratt, E. J. (1998). Improving the Berthelot reaction for determining ammonium in soil extracts and water. *Soil Science Society of America Journal*, 62(2), 473-480.
- Sahrawat, K. L. (2008). Factors affecting nitrification in soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 39(9-10), 1436-1446. <https://doi.org/10.1080/00103620802004235>
- Salman, N. D., & Kiss, P. (2018). Survey: Effect of bulk density and moisture content of soil on the penetration resistance and penetration depth. *Institute for Process Engineering*, 17, 109-118. https://www.researchgate.net/profile/Nihal-Salman-2/publication/342381145_Survey_Effect_of_bulk_density_and_moisture_content_of_soil_on_the_penetration_resistance_and_penetration_depth/links/5ef1e57ba6fdcc73be96e7a7/Survey-Effect-of-bulk-density-and-moisture-content-of-soil-on-the-penetration-resistance-and-penetration-depth.pdf?tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn19
- Santos, Y., da Silva, C., Viana, J., & da Silva, W. (2025). Influence of organic mulching on soil thermoregulation in the tocantina region of Maranhão. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 19(1), Artículo e010693. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n1-087>

- Scarlato, M., Rieppi, M., Alliaume, F., Illarze, G., Bajsa, N., Bertoni, P., Bianchi, F. J. A., Echeverriborda, G., Galván, G., García de Souza, M., Gilsanz, J. C., González Barrios, P., Dieste, J. P., Trasante, T., Rossing, W. A. H., & Dogliotti, S. (2024). Towards the development of cover crop - reduced tillage systems without herbicides and synthetic fertilizers in onion cultivation: Promising but challenges remain. *Soil & Tillage Research*, 240, Artículo e106061. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106061>
- Scarlato, M., Dogliotti, S., Bianchi, F. J. J. A., & Rossing, W. A. H. (2022). Ample room for reducing agrochemical inputs without productivity loss: The case of vegetable production in Uruguay. *Science of the Total Environment*, 810, Artículo e152248. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152248>
- Scarlato, M., Rieppi, M., Bajsa, N., Illarze, G., Alliaume, F., Trasante, T., Galván, G., García, M., Dieste, J. P., Laxalt, N., Costa, O., Gilsanz, J. C., Reggio, A., Bianchi, F. J. J. A., Rossing, W. A. H., & Dogliotti, S. (2020, 25-27 de noviembre). *Laboreo reducido en cultivo de cebolla orgánico: El manejo del nitrógeno y el control de malezas nos siguen desafiando* [Contribución]. VIII Congreso Latinoamericano de Agroecología: Agroecología. Identidad Latinoamericana tejiendo el territorio: Transformaciones urgentes para la vida, Montevideo.
- Schinner, F., Öhlinger, R., Kandeler, E., & Margesin, R. (1996). Enzymes involved in nitrogen metabolism. En F. Schinner, R. Öhlinger, E. Kandeler & R. Margesin (Eds.), *Methods in soil biology* (pp. 162-184). Springer.
- Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (1985). *Soil fertility and fertilizers* (4th ed.). McMillan.
- Trinsoutrot, I., Recous, S., Bentz, B., Linères, M., Chèneby, D., & Nicolardot, B. (2000). Biochemical quality of crop residues and carbon and nitrogen mineralization kinetics under nonlimiting nitrogen conditions. *Soil Science Society of America Journal*, 64(3), 918-926. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.643918x>
- Van Lierop, W. (1990). Soil ph and lime requirement determination. En R. L. Westerman (Ed.), *Soil testing and plant analysis* (Vol. 3, 3.^a ed., pp. 73-126). SSSA. <https://doi.org/10.2136/sssabookser3.3ed.c5>
- Warncke, D., & Brown, J. R. (1998). Potassium and other basic cations. En J. R. Brown (Ed.), *Recommended chemical soil test procedures for the north central region* (pp. 31-33). USDA.
- Yang, X. M., Reynolds, W. D., Drury, C. F., & Reeb, M. D. (2021). Cover crop effects on soil temperature in a clay loam soil in southwestern Ontario. *Canadian Journal of Soil Science*, 101(4), 761-770. <https://doi.org/10.1139/cjss-2021-0070>
- Zhang, Y., Xie, D., Ni, J., & Zeng, X. (2020). Conservation tillage practices reduce nitrogen losses in the sloping upland of the Three Gorges Reservoir area: No-till is better than mulch-till. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 300, Artículo e107003. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107003>

Zinati, G., Reddivari, L., & Kemper, D. (2019). *Reduced-tillage increases nutrient concentrations in stored winter squash: α -Carotene, Lutein, Phosphorus and Calcium*. Rodale Institute.

8. ANEXOS

Anexo A

Densidad aparente y resistencia a la penetración en suelo, según historia de manejo

			SD	D1	D2	D2+M
14/7/23	DAp	LR	<i>0,98±0,04</i>	<i>0,99±0,04</i>	<i>0,98±0,04</i>	<i>0,95±0,04</i>
						4
		LC	<i>0,96±0,04</i>	<i>0,98±0,04</i>	<i>1,02±0,04</i>	<i>1,02±0,04</i>
						4
31/1/24	DAp	LR	<i>0,98±0,03</i>	<i>0,92±0,03</i>	<i>0,97±0,03</i>	<i>0,95±0,03</i>
						3
		LC	<i>0,96±0,03</i>	<i>0,95±0,03</i>	<i>0,94±0,03</i>	<i>0,95±0,03</i>
						3
25/07/2	RP0-10	LR	<i>62±21 b</i>	<i>92±31 b</i>	<i>68±24 b</i>	<i>50±17 b</i>
3		LC	<i>48±13 b</i>	<i>82±29 ba</i>	<i>43±15 b</i>	<i>154±53 a</i>
25/1/24	RP0-10	LR	<i>265±63 b</i>	<i>160±38 b</i>	<i>242±57 b</i>	<i>239±57 b</i>
		LC	<i>151±36 b</i>	<i>244±58 b</i>	<i>193±46 b</i>	<i>201±75 b</i>
25/1/24	RP11-20	LR	<i>546±92</i>	<i>516±87</i>	<i>610±103</i>	<i>555±93</i>
		LC	<i>613±103</i>	<i>722±122</i>	<i>478±80</i>	<i>457±77</i>
25/1/24	RP21-30	LR	<i>720±93</i>	<i>712±92</i>	<i>603±78</i>	<i>733±95</i>
		LC	<i>747±97</i>	<i>834±108</i>	<i>748±97</i>	<i>558±72</i>
25/1/24	RP31-45	LR	<i>864±77</i>	<i>1092±97</i>	<i>895±79</i>	<i>1018±90</i>
		LC	<i>1107±98</i>	<i>938±83</i>	<i>1065±94</i>	<i>832±73,8</i>

Nota. Letras distintas implica diferencias significativas ($p \leq 0,5$).

Anexo B

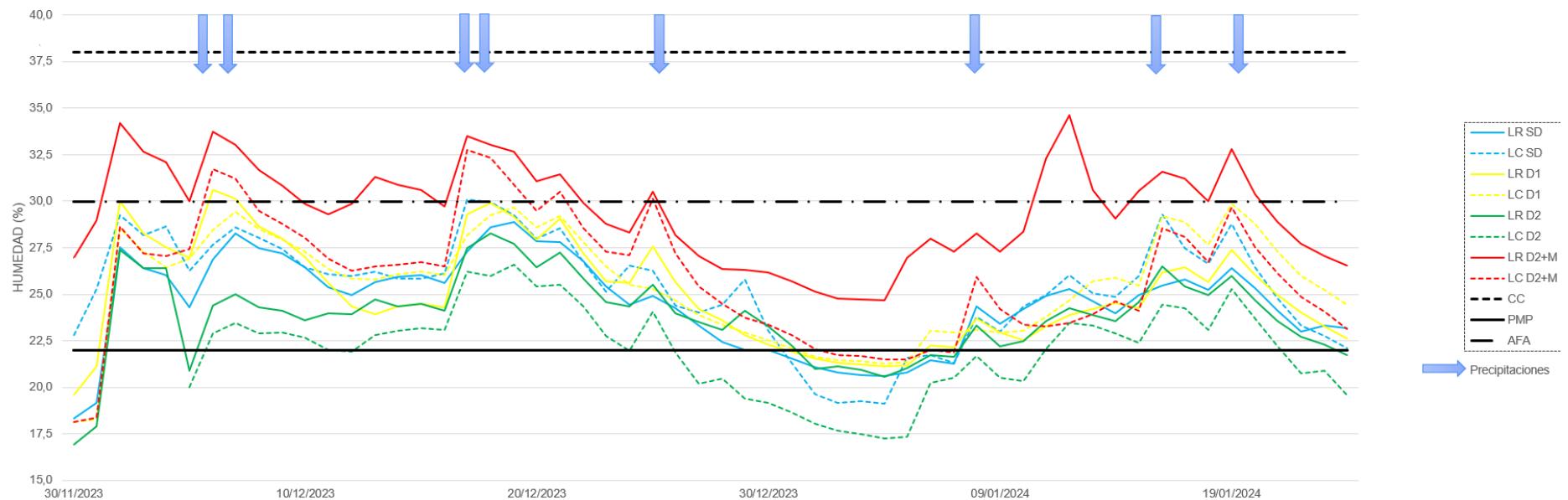
Resistencia a la penetración del suelo según tratamiento actual (Kpa), para el 25/07/23

	<i>SD</i>	<i>D1</i>	<i>D2</i>	<i>D2+M</i>
RP11-20	307 ± 31 b	466 ± 47 a	492 ± 50 a	598 ± 61 a
RP21-30	579 ± 54 b	1051 ± 100 a	869 ± 81 a	995 ± 107 a

Nota. Letras distintas implica diferencias significativas ($p \leq 0,5$).

Anexo C

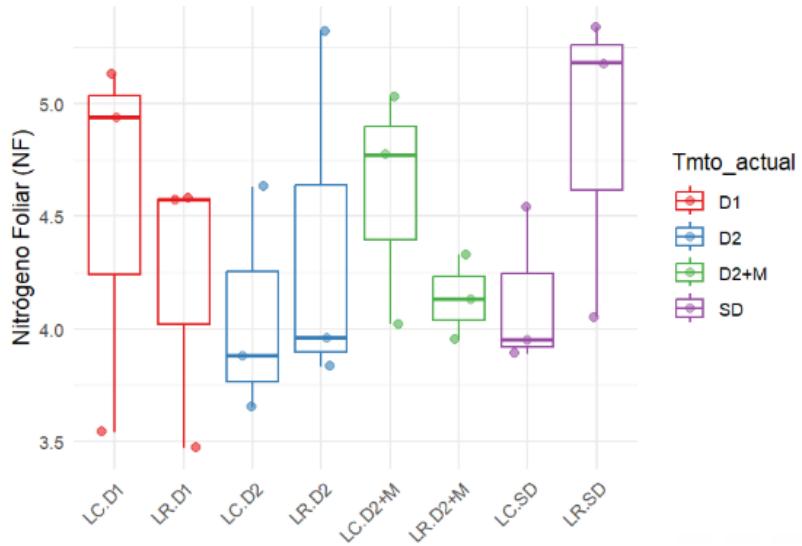
Humedad promedio del suelo (0-10 cm de profundidad) según de los tratamientos



Nota. Cálculo teórico de CC (38%) y PMP (22%) según ecuación de Fernández (1979, como se cita en Kaplán et al., 2015)), teniendo en cuenta el % de MOS, y la composición granulométrica del suelo (% de arcilla, % de limo, % de arena), corregidos por DAp promedio. Registros de precipitaciones pluviométricos del Centro Regional Sur- Facultad de Agronomía. AFA (Agua fácilmente aprovechable) calculada según FAO (Allen et al., 1998), como la fracción p del agua disponible total (ADT): $AFA = p \times (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \times Z_r$. El valor p representa la fracción del agua que las raíces pueden extraer sin reducción de la evapotranspiración; se utilizó $p = 0,5$ de acuerdo con FAO 56 (ajustada por ETc ≈ 5 mm dia $^{-1}$).

Referencias bibliográficas

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO.
- Kaplán, A., Labella, S., Rucks, L., & Durán, A. (2015). *Manual para la descripción e interpretación del perfil del suelo*. Universidad de la República.

Anexo D*Concentración de N foliar (%) de calabacín a los 57 dpt según tratamiento*

Anexo E

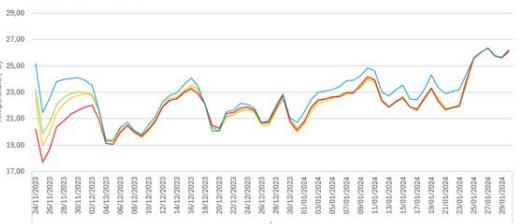
Temperatura máxima, mínima y promedio de la profundidad del suelo a tres profundidades

Temperatura máxima

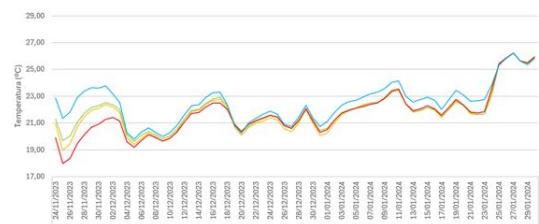
Profundidad A



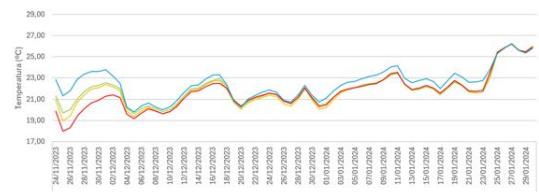
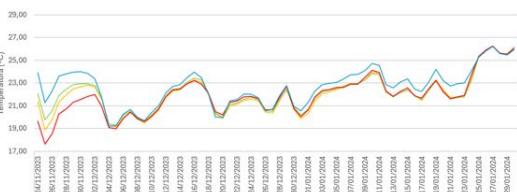
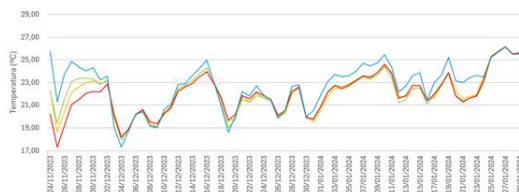
Profundidad B



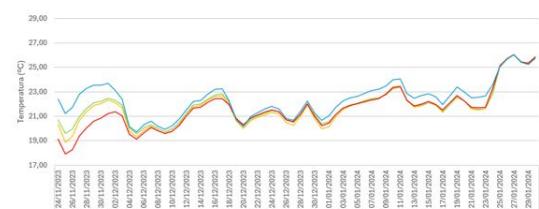
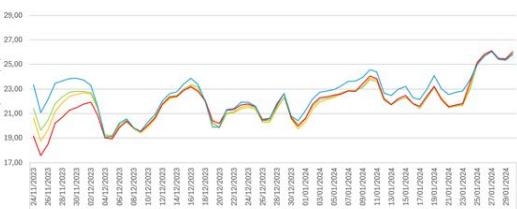
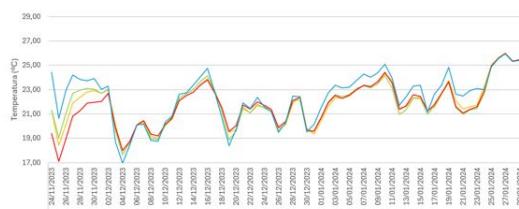
Profundidad C



Temperatura media



Temperatura mínima



Nota. Azul: SD, naranja: D1, verde: D2, rojo: D2 + M. A:1-5 cm, B: 8-11 cm, C: 15-18 cm.

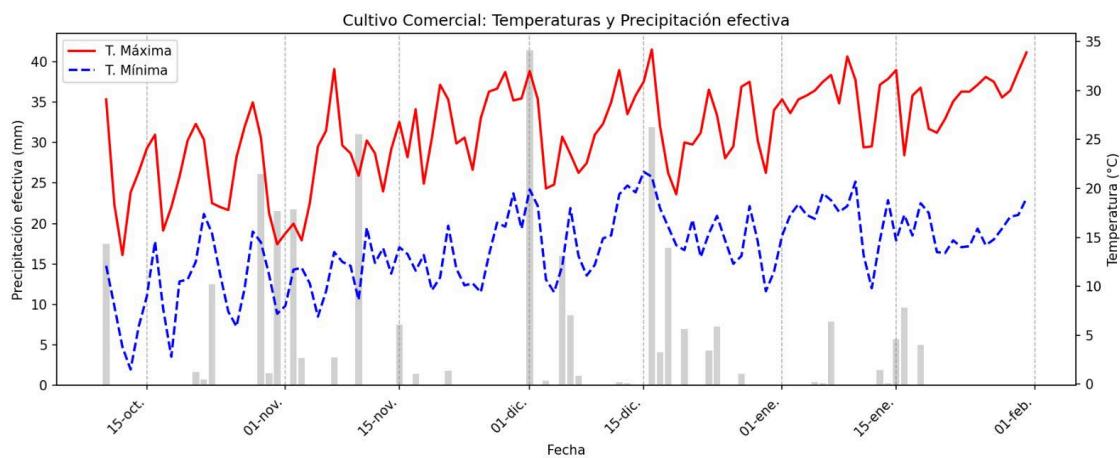
Anexo F*Biomasa total y por especie al acamado del cultivo de cobertura*

<i>Tratamiento actual</i>	<i>Biomasa Total</i>	<i>Biomasa centeno</i>	<i>Biomasa lupino</i>	<i>Biomasa malezas</i>	<i>Relación C/N</i>
D1	12,55	11,3	0,7	0,6	13,25
D2	12,85	12,15	0,35	0,35	14,25
D2 + M	12,90	12,05	0,6	0,25	17,3

Nota. Biomasa, promedio por tratamiento sin considerar la historia de laboreo.

Anexo G

Precipitación y temperaturas máxima y mínima en el período de cultivo de calabacín



Nota. Registros diarios de precipitación efectiva, temperatura máxima y mínima, tomados a las 9 am en la estación INIA Las Brujas (-56,34, -34,67, elevación 32m).

Anexo H*Cobertura del suelo según tratamiento actual, al 22/11/23*

	<i>Suelo Desnudo</i>	<i>Centeno</i>	<i>Mulch</i>	<i>Maleza + Mulch</i>	<i>Maleza</i>
%					
D1	64	0	0	19	17
D2	13,5	0	63,5	7	16
D2 + M	9	2	69	0	20
SD	0	0	96	0	4

Nota. Cobertura, promedio por tratamiento sin considerar la historia de laboreo.

Anexo J*Crecimiento y desarrollo de las plantas de calabacín a los 43 dpt*

		SD	D1	D2	D2+M	
Nº	Hojas completamente desarrollada (hojas planta ⁻¹)	LR	$6,3 \pm 0,4$	$5,04 \pm 0,3$	$5,84 \pm 0,4$	$5,7 \pm 0,4$
		LC	$5,4 \pm 0,4$	$5,3 \pm 0,4$	$5,79 \pm 0,4$	$6,0 \pm 0,4$
N foliar (%)		LR	$4,8 \pm 0,3$	$4,2 \pm 0,3$	$4,3 \pm 0,3$	$4,1 \pm 0,3$
		LC	$4,1 \pm 0,3$	$4,5 \pm 0,3$	$4,0 \pm 0,3$	$4,6 \pm 0,3$

Nota. Letras distintas implica diferencias significativas ($p \leq 0,5$).