

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**IMPACTO DE LA ROTACIÓN, ESCARIFICADO Y RIEGO SOBRE EL
RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE SOJA Y PROPIEDADES FÍSICAS DEL
SUELO EN SISTEMAS ARROCEROS**

por

**Manuela BARROS VALENTI
Magdalena LA PAZ BOGLIACINO**

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

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2025**

PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Director:

Ing. Agr. (Ph.D.) Ignacio Macedo Yapor

Co-Director:

Ing. Agr. (Ph.D.) Jesús Castillo

Tribunal:

Ing. Agr. (Ph.D.) Gonzalo Rizzo

Ing. Agr. (Ph.D.) Valentina Rubio

Ing. Agr. (Ph.D.) Ignacio Macedo Yapor

Fecha:

27 de marzo de 2025

Estudiante:

Manuela Barros Valenti

Magdalena La Paz Bogliacino

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer al Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), especialmente al INIA Treinta y Tres por permitirnos realizar nuestro trabajo final de grado en sus instalaciones.

A la Facultad de Agronomía de la Universidad de la República (Udelar) por formarnos estos cinco años, brindándonos los conocimientos y herramientas necesarias para crecer tanto personal como profesionalmente.

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a nuestro tutor y co-tutor, Nacho y Jesús, por su apoyo, guía y colaboración durante todo este proceso así como a todo el equipo de INIA Treinta y tres, especialmente a Irma, Alexander y Matías por su disposición y apoyo en las tareas de campo y laboratorio.

También extendemos nuestro reconocimiento a nuestras familias, en especial a nuestros padres, y hermanos por su apoyo incondicional, paciencia y comprensión.

Finalmente, agradecemos a nuestros amigos de la carrera y futuros colegas por ser parte fundamental en este camino.

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	2
AGRADECIMIENTOS	3
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	6
RESUMEN.....	7
ABSTRACT	8
1. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1. OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS.....	10
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1. CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS ARROCEROS EN URUGUAY	11
2.2. INCLUSIÓN DE SOJA EN SISTEMAS ARROCEROS	12
2.2.1. BENEFICIOS Y LIMITANTES DE LA INCORPORACIÓN DEL CULTIVO DE SOJA	12
2.2.2. BRECHAS DE RENDIMIENTO DE SOJA.....	12
2.2.3. RESPUESTA AL RIEGO	13
2.3. PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO.....	14
2.3.1. INDICADORES DE CALIDAD FÍSICA DEL SUELO	14
2.3.2. LABOREO VERTICAL PROFUNDO COMO HERRAMIENTA DE DESCOMPACTACIÓN	15
2.3.3. INFILTRACIÓN.....	16
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
3.1. DESCRIPCIÓN DEL SITIO Y DEL EXPERIMENTO	18
3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL	18
3.3. MANEJO DEL CULTIVO	20
3.4. DETERMINACIONES EN EL CULTIVO.....	21
3.5. DETERMINACIONES EN SUELO	22
3.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	24
4. RESULTADOS	26
4.1. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE LA ZAFRA.....	26
4.1.1. PRECIPITACIONES	26
4.1.2. RADIACIÓN SOLAR	27
4.1.3. TEMPERATURA	28
4.1.4. AGUA DISPONIBLE	28
4.2. VARIABLES AGRONÓMICAS DE INTERÉS	30

4.3. DETERMINACIONES A NIVEL DE SUELO.....	31
4.3.1. RESIDUOS.....	31
4.3.2. RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN.....	31
4.3.3. INFILTRACIÓN.....	35
4.3.4. HUELLADO.....	37
4.4. RESULTADOS DE DETERMINACIONES EN CULTIVO.....	37
4.4.1. NDVI.....	37
4.4.2. COBERTURA DEL CULTIVO.....	38
4.4.3. ALTURA DE PLANTA.....	39
4.4.4. SPAD.....	40
4.4.5. BIOMASA.....	41
4.4.6. COMPONENTES DE RENDIMIENTO	42
4.4.7. RENDIMIENTO.....	43
4.4.8. EFECTO DE LA RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN SOBRE LA PRODUCTIVIDAD LOGRADA.....	44
5. DISCUSIÓN.....	46
6. CONCLUSIONES	50
7. BIBLIOGRAFÍA	51
8. ANEXOS.....	58

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla 1 Rotaciones contrastadas y su duración	19
Tabla 2 Estadística descriptiva de las variables analizadas.....	30
Tabla 3 Componentes de rendimiento de soja.....	43
Figura 1 Representación de las parcelas evaluadas con la disposición espacial de los tratamientos experimentales	19
Figura 2 Precipitaciones acumuladas mensuales	26
Figura 3 Distribución de las precipitaciones y riego a lo largo del ciclo del cultivo	27
Figura 4 Radiación solar durante el ciclo del cultivo en comparación con el promedio histórico (últimos 30 años).....	27
Figura 5 Temperatura máxima, media y mínima durante el ciclo del cultivo en relación al promedio histórico	28
Figura 6 Evolución del agua disponible durante el cultivo de soja en los tratamientos con riego	29
Figura 7 Evolución del agua disponible durante el cultivo de soja en los tratamientos sin riego	29
Figura 8 Porcentaje de residuos en superficie según tratamiento en estadíos iniciales del cultivo de soja (V3-V4).....	31
Figura 9 RP en el perfil del suelo previo a la siembra (55 días pos laboreo).....	32
Figura 10 RP en el perfil del suelo medida en forma posterior a la cosecha (220 días pos laboreo)	33
Figura 11 RP del suelo según tratamiento y rotaciones, previo a la siembra (55 días pos laboreo)	34
Figura 12 RP del suelo según tratamiento y rotaciones, posterior a la cosecha (220 días pos laboreo)	34
Figura 13 Infiltración acumulada para los diferentes tratamientos medido en dos momentos	35
Figura 14 Infiltración acumulada para los diferentes tratamientos y rotaciones, medido en dos momentos	36
Figura 15 Huellado del terreno por causa del pasaje de la cosechadora medido en cada tratamiento.....	37
Figura 16 Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) durante el ciclo del cultivo en los diferentes tratamientos	38
Figura 17 Porcentaje de cobertura según estado fenológico para los diferentes tratamientos	39
Figura 18 Altura de planta (cm) del cultivo de soja según estado fenológico para cada tratamiento.....	40
Figura 19 Valores de SPAD a lo largo del ciclo del cultivo según tratamientos	41
Figura 20 Biomasa (kg ha^{-1})según estado fenológico para los diferentes tratamientos	42
Figura 21 Rendimiento de soja según rotación y tratamiento	44
Figura 22 Relación entre el rendimiento y resistencia a la penetración.....	45

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue evaluar el impacto de la rotación, el laboreo vertical profundo (escarificado) y el riego sobre el rendimiento del cultivo de soja y las propiedades físicas del suelo en sistemas arroceros de Uruguay. El estudio se llevó a cabo en el experimento de largo plazo de rotaciones arroceras, en la unidad experimental del Paso de la Laguna de INIA en el departamento de Treinta y Tres, Uruguay (33° 16' 23" S; 54° 10' 24" W; 22 MASL). En el mismo se compararon dos sistemas de rotación: uno que incluye pasturas (Arroz-soja-pasturas) y otro de agricultura continua (Arroz-soja). Ambas rotaciones tienen todas sus fases presentes cada año y están replicadas tres veces en el espacio. Los tratamientos evaluados en cada rotación fueron: escarificado, riego, escarificado + riego, y un control, bajo siembra directa en seco. Durante el ciclo del cultivo de soja se relevaron diversas variables del cultivo (población, NDVI, cobertura, SPAD, altura, biomasa, componentes de rendimiento y rendimiento) y del suelo (residuos, resistencia a la penetración, infiltración y huellado).

La zafra se desarrolló bajo condiciones climáticas particulares, con precipitaciones superiores al promedio histórico con excesos de agua y con una fecha de siembra tardía, lo que resultó en una menor radiación solar incidente durante el ciclo del cultivo. En este caso, la elevada oferta hídrica podría haber enmascarado el efecto beneficioso del riego. Aun así, los tratamientos con riego se destacaron en varias de las variables evaluadas en el cultivo. Los resultados indican que el escarificado redujo la resistencia a la penetración y mejoró la infiltración de agua. A su vez, se observa que la respuesta en las mejoras físicas derivadas del escarificado en la rotación con pasturas fue menor, aunque más estables en el tiempo. No obstante, no se observaron diferencias significativas entre las rotaciones, lo que podría atribuirse a la implementación sostenida de buenas prácticas de manejo en el sistema de agricultura continua, como la siembra directa y la inclusión de cultivos de cobertura. En esta evaluación, no se observaron diferencias significativas en el rendimiento del cultivo de soja entre tratamientos ni entre rotaciones.

Palabras clave: rendimiento de soja, escarificado, riego, infiltración de agua, compactación, sistemas arroceros

ABSTRACT

The main objective of the present research was to evaluate the impact of crop rotation, vertical tillage (chisel plow) , and irrigation on soybean yield and soil physical properties in rice farming systems in Uruguay. The study was conducted in a long-term rice rotation experiment at the Paso de la Laguna experimental unit of INIA, in Treinta y Tres, Uruguay (33° 16' 23" S; 54° 10' 24" W; 22 MASL). Two rotation systems were compared: one that includes pastures (Rice-soybean-pasture) and another with continuous agriculture (Rice-soybean). Both rotations have all their phases present each year and are replicated three times in space. The treatments evaluated in each rotation were: vertical tillage, irrigation, vertical tillage + irrigation, and a control, with direct seeding under dryland conditions. During the soybean growing cycle, various crop variables (population, NDVI, coverage, SPAD, height, biomass, yield components, and yield) and soil variables (residue, penetration resistance, infiltration, and wheel traffic) were measured.

The study occurred under particular climatic conditions, with excessive precipitation and a late sowing date, which resulted in reduced solar radiation during the growing cycle. In this case, the excess water may have masked the beneficial effect of irrigation. Nevertheless, irrigation treatments performed better in several of the crop variables assessed. The results indicate that chisel plow reduces penetration resistance and improves water infiltration. Furthermore, it was observed that the physical improvements from chisel plow in the pasture rotation were smaller but more stable over time. However, no significant differences were observed between rotations, which could be attributed to the sustained implementation of good management practices in the continuous agriculture system, such as direct seeding and the inclusion of cover crops. In this evaluation, no significant differences in soybean yield were observed between treatments or rotations.

Keywords: soybean yield, subsoiling, irrigation, compaction, water infiltration, rice-based systems

1. INTRODUCCIÓN

El cultivo de arroz en Uruguay se caracteriza por una marcada regionalización, concentrándose principalmente en el este del país, que abarca el 70% del área sembrada, seguido por las regiones centro (20%) y norte-litoral oeste (10%) (Oficina de Estadísticas Agropecuarias [DIEA], 2019). Históricamente la producción de arroz en el país ha alternado el uso del suelo con pasturas destinadas a la producción ganadera lo que brinda diversos beneficios al sistema. La presencia de praderas compuestas de gramíneas y leguminosas mejora la disponibilidad de nutrientes y la estructura del suelo, reduciendo el encostramiento y facilitando la instalación del cultivo de arroz (Deambrosi & Mendéz, 2000). Además, esta rotación ha permitido a los productores aumentar la productividad, conservar la calidad del suelo y reducir el uso de pesticidas y fertilizantes, especialmente de nitrógeno, en comparación con otros sistemas de cultivo de arroz en el mundo (Deambrosi, 2003).

Por otro lado, el cultivo de soja ha experimentado una expansión gradual, donde el 50% del área se concentra en la región norte-litoral oeste, 7% en el centro y 9% en la zona este del país (Asociación Uruguaya para la Protección de Obtentores Vegetales, 2022). La llegada de la soja a la región arroceras se debe en gran medida a la creciente necesidad de incorporar a los sistemas arroceros alternativas productivas y económicamente viables, así como beneficiarse de los buenos precios que ha tenido el cultivo de soja los últimos años con el fin de intensificar los sistemas y aumentar su productividad (Castillo et al., 2013).

La elección de soja como cultivo de verano complementario surge como opción para diversificar e intensificar los sistemas arroceros con un impacto positivo como antecesor del cultivo de arroz y que contribuye a la reducción de costos (Molina & Terra, 2023). Además, permite incorporar alternativas para el control de malezas tales como el arroz rojo, el cual se presenta como un problema recurrente, lo que permite aumentar la productividad del cultivo de arroz en un 15% y permite una siembra en fecha óptima (Terra et al., 2014). Debido a lo mencionado anteriormente, en los últimos años se ha observado un aumento en el área sembrada de arroz sobre posterior a una soja, alcanzando el 20% en 2022, acompañado de un descenso en el área sembrada sobre retornos de laboreo de verano, el cual ocupó un 50% del área en la zafra 2020/21 (Molina & Terra, 2023).

Adicionalmente, los rendimientos medios de soja en los últimos 5 años se encuentran alrededor de los 2000 kg ha⁻¹ (Oficina de Estadísticas Agropecuarias [DIEA], 2023), los cuales dependen en gran medida de las condiciones climáticas, principalmente del régimen hídrico de la zafra el cual determina una brecha importante entre los rendimientos comerciales y los rendimientos potenciales alcanzables (Ciampitti & García, 2009; Giménez, 2012).

En rotaciones de arroz y soja se han observado capas compactadas cerca de la superficie que aumentan la densidad aparente del suelo, reducen la porosidad y elevan la resistencia a la penetración, limitando la capacidad de las raíces de soja para extraer agua y nutrientes, lo cual podría afectar su rendimiento (Sartori et al., 2015). Es por esto que se buscan medidas de manejo tales como la incorporación de pasturas en la rotación y el laboreo vertical a modo de descompactar el suelo y mejorar las propiedades físicas del mismo.

La hipótesis planteada en este trabajo es:

Dado que la inclusión de pasturas contribuye a mejorar las propiedades físicas del suelo, entonces es esperable que los sistemas que las incorporen presenten un mayor rendimiento de los cultivos y una menor degradación de dichas propiedades en comparación con sistemas de agricultura continua. Este beneficio es evidente incluso en condiciones donde se empleen herramientas de descompactación y prácticas de manejo como el riego.

1.1. OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS

OBJETIVO GENERAL

- Evaluar el efecto de la descompactación subsuperficial con y sin limitantes hídricas, sobre el rendimiento del cultivo de soja y las propiedades físicas del suelo en rotaciones de agricultura continua y con incorporación de pasturas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Cuantificar el efecto de la descompactación sobre el rendimiento de soja con y sin limitantes hídricas.
- Evaluar el impacto de la descompactación en la resistencia a la penetración e infiltración.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS ARROCEROS EN URUGUAY

El arroz es uno de los principales productos agrícolas del país destinado en más de un 95% a la exportación. El área sembrada es de alrededor de 170.000 hectáreas por año con un rendimiento promedio de 8900 kg ha⁻¹ (DIEA, 2023), uno de los rendimientos por hectárea más altos registrados en el mundo. No obstante, aún existe margen para seguir incrementando estos rendimientos, ya que el rendimiento potencial se estima en alrededor de 14000 kg ha⁻¹ y el alcanzable sería el 80% del mismo (11000 kg ha⁻¹) (Carracelas et al., 2021).

Tradicionalmente, el arroz alterna el uso del suelo con pasturas perennes, integrando así la producción ganadera y otorgando ventajas en cuanto a la calidad física del suelo y diversificando ingresos. Sin embargo, en la última década, esta rotación ha cambiado debido en parte a los altos costos productivos razón por la cual los productores muchas veces no logran retornos económicos razonables por lo que se está en busca constante de medidas de intensificación sostenible de los sistemas arroceros (Zorrilla & Terra, 2017), por lo que se ha optado por la inclusión del cultivo de soja en las rotaciones arroceras. Actualmente, entre el 20 y 30% del área sembrada de arroz proviene de soja (Molina & Terra, 2023). No obstante, el hecho de intensificar las rotaciones aumentando la relación cultivo/pastura podría reducir el efecto benéfico de las pasturas en el sistema. La mayor presencia agrícola en la secuencia pecuaria-arrocera trae como resultado una serie de dificultades en la producción del cultivo, como pueden ser un mayor encostramiento de los suelos luego de las lluvias lo que dificulta la emergencia y mayor presencia de enfermedades y malezas (Deambrosi & Méndez, 2000).

Al evaluar el efecto de las praderas en la rotación se ha encontrado un menor deterioro de las propiedades físicas del suelo, por ejemplo, en la densidad aparente, cuando existió una siembra de praderas luego del cultivo de arroz, lo que mejora las condiciones del suelo para la instalación del cultivo (Deambrosi & Méndez, 2000). Estos autores señalaron además que el efecto benéfico no solo se manifestó en las propiedades físicas del suelo sino también en aumentos de rendimiento del cultivo sembrado luego de

praderas y menor requerimiento de aplicación de nutrientes para obtener valores de producción más elevados.

2.2. INCLUSIÓN DE SOJA EN SISTEMAS ARROCEROS

2.2.1. BENEFICIOS Y LIMITANTES DE LA INCORPORACIÓN DEL CULTIVO DE SOJA

La incorporación de la soja en sistemas arroceros, es una alternativa que apunta a diversificar ingresos e inclusive mejorarlos. Según Terra et al. (2014), algunos beneficios de la inclusión de la soja en rotación con arroz son, el control de malezas, incrementos en el rendimiento del arroz posterior y la dilución de costos asociados al laboreo del cultivo de arroz. Sin embargo, las características de los suelos arroceros y la topografía ostentan ser una limitante para el cultivo de soja. La mayoría de los suelos tienen un drenaje interno imperfecto, fertilidad media-baja, limitantes de exploración radicular efectiva y de muy baja (<40mm) a baja (40-80 mm) capacidad de almacenamiento de agua potencialmente disponible (Molfino & Califra, 2001), que entre otros define un volumen de agua disponible limitado y compromete la supervivencia del rizobio asociado a la soja, lo que se traduce en menor capacidad de fijar nitrógeno (Terra et al., 2014).

Por otro lado, la sustitución de pasturas perennes por cultivos de secano, por ejemplo soja, incluso incluyendo cultivos de cobertura, resultan en una pérdida de 15% de carbono orgánico y nitrógeno total del suelo en la fracción lábil, lo que genera que sistemas sin pasturas perennes sean más vulnerables a pérdidas de calidad de suelo a largo plazo (Macedo et al., 2021).

2.2.2. BRECHAS DE RENDIMIENTO DE SOJA

El rendimiento potencial de un cultivo es aquel que se lograría cuando el cultivo crece en un ambiente sin limitantes de agua y nutrientes y con efectivo control de enfermedades, plagas y malezas (Evans & Fischer, 1999), por lo que el crecimiento del cultivo está determinado por radiación solar, temperatura, CO₂ y genética (Van Ittersum et al., 2013). Una vez establecido el cultivo en un ambiente propicio; el rendimiento puede ser limitado por la disponibilidad de nutrientes y de agua (rendimiento alcanzable). Para cultivos de secano, el rendimiento limitado por el agua es el punto de referencia más relevante y su definición es similar a la de rendimiento potencial con la diferencia de que

el cultivo también está limitado por el suministro de agua y, por lo tanto, influenciado por el tipo de suelo (capacidad de retención de agua y profundidad de las raíces) y la topografía del terreno (escorrentía) (Van Ittersum et al., 2013). Aun cuando los factores definitorios y limitantes del rendimiento se encuentren en niveles óptimos, existen otros factores que reducen el rendimiento como los insectos, las enfermedades y las malezas, esto se conoce como rendimiento actual (Quintero, 2017). La diferencia entre el rendimiento potencial o alcanzable y el rendimiento actual se denomina brecha de rendimiento (Van Ittersum et al., 2013).

El rendimiento potencial del cultivo de soja en Uruguay es de aproximadamente 6000 kg ha⁻¹ mientras que el rendimiento limitado por agua se encuentra alrededor de 3500 kg ha⁻¹ (Rizzo et al., 2021). Por otro lado, el rendimiento promedio actual de soja de las últimas cinco zafas según la DIEA (2023) ronda los 2000 kg ha⁻¹ con un coeficiente de variación interanual de 43% aproximadamente. A diferencia del cultivo de arroz, la brecha de rendimiento del cultivo de soja es considerablemente mayor, siendo el rendimiento actual entre 30 a 40% menor que el alcanzable. La importancia de conocer la brecha de rendimiento radica en el desafío de entender los factores que la explican para poder reducirla. Trabajos recientes a nivel nacional muestran que la mayor proporción de la brecha del cultivo de soja se explica por las limitantes hídricas (40 a 45%) y el restante se debe a prácticas de manejo (Rizzo et al., 2021).

2.2.3. RESPUESTA AL RIEGO

En los cultivos de verano de secano como la soja, la disponibilidad hídrica constituye la principal limitante de los ambientes de producción y es por ende la determinante principal del rendimiento. Cuando la disponibilidad de agua no se adecua a los requerimientos de los cultivos en las diferentes etapas de desarrollo, los rendimientos de los cultivos disminuyen su potencial. Además, las pérdidas de rendimiento debidas a deficiencias hídricas durante el periodo crítico de definición de rendimiento, que abarca los estadios entre R4 y R6 (Fehr & Caviness, 1977), pueden oscilar entre 2500 y 3200 kg ha⁻¹ representando aproximadamente la mitad del potencial (Giménez, 2012; Giménez et al., 2014).

La escasa capacidad de almacenamiento de agua disponible (CAAD) de los suelos y la presencia de horizonte Bt generan una dependencia de las recargas hídricas en los

sistemas de nuestro país. Sin riego, estas recargas provienen únicamente de las precipitaciones, que, a pesar de que Uruguay presenta un promedio anual de lluvias superior a 1200 mm, exhiben una alta variabilidad interanual y baja efectividad. Además, la demanda atmosférica es elevada y constante, especialmente en los meses de diciembre y enero, lo que puede generar mayor riesgo de déficit hídrico (L. Giménez & M. Bustamante, comunicación personal, 12 de marzo de 2024).

En consecuencia, se busca la incorporación de avances tecnológicos en los sistemas agrícolas para superar esta limitante, destacándose el riego como opción para ello. Según L. Giménez y M. Bustamante (comunicación personal, 12 de marzo de 2024) para diferentes cultivos de verano en secano en diversas localidades, el promedio de las deficiencias de agua se estimó en un 35% del consumo potencial de agua, cifra que justifica la implementación del riego suplementario, el cual consiste en proporcionar agua a los cultivos cuando las precipitaciones no son suficientes para satisfacer sus necesidades hídricas.

2.3. PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

2.3.1. INDICADORES DE CALIDAD FÍSICA DEL SUELO

La calidad física del suelo (CFS) se refiere a su capacidad para satisfacer las necesidades de las plantas y los ecosistemas en términos de agua, aireación, resiliencia y resistencia a lo largo del tiempo, así como para resistir y recuperarse de procesos que puedan disminuir esa capacidad (McKenzie et al., 2014). La pérdida de CFS tiene efecto sobre distintos procesos que son propios: el intercambio de gases, la infiltración y almacenamiento de agua, el crecimiento y la función radicular, entre otros (Restaino & Quincke, 2018). En muchos casos, la CFS puede ser difícil de medir directamente por lo que se utilizan indicadores que sirven como una medida práctica e indirecta del atributo (Carter, 2002). Algunos de estos indicadores pueden ser la densidad aparente, estabilidad de los agregados, infiltración, resistencia a la penetración y la capacidad de almacenamiento del agua disponible en el suelo.

Lal (1994) establece que los cambios temporales en las propiedades del suelo con labranza son indicadores que se utilizan para determinar si mejora o no la CFS, si se

mantiene estable o disminuye con el tiempo y en base a esto, se han establecido niveles críticos para algunos indicadores, lo cual permite relacionarlos con la posterior productividad. Por ejemplo, el valor crítico de resistencia a la penetración que impide la elongación radicular de la soja se asume en 2 MPa (Bengough et al., 2011).

La compactación del suelo es uno de los principales componentes de su degradación y por ende de pérdida de CFS. La compactación del suelo consiste en la disminución del espacio poroso, lo que provoca menor infiltración del agua y aireación del suelo, restringiendo el crecimiento radicular (Etcheberry & Ernst, 2018). Esta problemática que enfrentan los sistemas agrícolas ha aumentado en las últimas décadas debido a la intensificación agrícola y el tráfico de maquinaria de gran porte, aunque también puede ser originada por la aplicación de otros tipos de estrés (lluvia o pisoteo animal) sobre un suelo susceptible (Batey, 2009). Asimismo, según Formoso (2007), la falta de laboreo en siembra directa aumenta la compactación del horizonte más superficial del suelo.

Aunque la compactación tiene asociado como principal efecto adverso la productividad de los cultivos comerciales, predecir su efecto sobre los cultivos puede resultar difícil. Esto es debido a la complejidad de las interacciones entre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Por otro lado, la mejor estrategia para el manejo de la compactación es su prevención, dado que una vez que el suelo está compactado la recuperación biológica o natural puede resultar lenta o insuficiente. Como se ha mencionado anteriormente, la incorporación de pasturas perennes en la rotación es una medida clave para mitigar el impacto de la compactación asociado en gran parte a la agricultura continua. Sin embargo, las prácticas de descompactación mecánicas, como el laboreo profundo, están ampliamente difundidas ya que logran un efecto rápido, al menos durante breves periodos de tiempo (Alakukku et al., 2003; Batey, 2009; Hamza & Anderson, 2005; Logsdon & Karlen, 2004).

2.3.2. LABOREO VERTICAL PROFUNDO COMO HERRAMIENTA DE DESCOMPACTACIÓN

Además de la rapidez de su efecto, medidas correctivas como la descompactación mecánica con herramientas de laboreo vertical profundo tienen la ventaja de adaptarse a sistemas de SD ya que permiten laborear el suelo a nivel subsuperficial sin producir

inversión del suelo en superficie (Restaino & Quincke, 2018). La CFS puede tener efectos directos e indirectos sobre los cultivos. Si bien el laboreo profundo no parecería tener un efecto directo sobre el rendimiento del cultivo de soja, su respuesta a la descompactación puede asociarse con una mejora en la captura de recursos (Sadras et al., 2005).

Además, Girardello et al. (2014) encuentran que el escarificado no aumenta la productividad de la soja en suelos manejados bajo un sistema de siembra directa con resistencia a la penetración baja a moderada, especialmente en condiciones de altas precipitaciones. De manera similar, Girardello et al. (2014) y Lefever et al. (2024) concluyen que el laboreo profundo no genera aumentos en el rendimiento de soja, mientras que Sartori et al. (2015) observan que la escarificación solo mejora el rendimiento en zonas de llanura con capas compactadas cercanas a la superficie.

En cuanto a la efectividad de las herramientas que generan laboreo vertical, como lo es el paraplow, Rubio (2018) señala que, aunque mejoró la CFS, la resistencia a la penetración (RP) y la densidad aparente (Dap), ésta resultó ser una herramienta poco efectiva. Los efectos indirectos esperados, como la mejora en la disponibilidad de agua y nutrientes, tuvieron un impacto limitado. La autora sugiere que la escasa magnitud de los cambios podría atribuirse a condiciones climáticas favorables y/o a la rápida recompactación del suelo, y plantea que podrían observarse cambios más significativos en presencia de condiciones climáticas más extremas.

Peralta et al. (2021) señalan que durante un período de 17 meses, la persistencia de los efectos del laboreo vertical resultó en un incremento en el rendimiento de soja de una tonelada de grano por hectárea, especialmente en el rango de rendimiento más bajo y en suelos arcillosos. Contrastante con otras observaciones anteriormente mencionadas que sugieren una menor efectividad en términos de incremento de rendimiento.

2.3.3. INFILTRACIÓN

La infiltración se define como el proceso mediante el cual el agua entra al suelo. La tasa de infiltración determina cuánto agua se escurre por la superficie y cuánto ingresa efectivamente al perfil del suelo (Sawchik, 1996). Su importancia radica en el impacto que tiene en el intercambio de agua entre el suelo y el cultivo. Esta tasa puede verse modificada por las labores realizadas en el suelo, siendo el laboreo una herramienta que

facilita la infiltración del agua y beneficia al cultivo, especialmente en términos de captación durante lluvias intensas en primavera y verano (Martino, 2001).

Según McConkey et al. (1997), el subsolado ≥ 35 cm aumentó la cantidad de agua presente en el suelo en años con precipitaciones elevadas pero no tuvo efecto en el contenido de agua del suelo durante años con precipitaciones por debajo del promedio. Según lo evidenciado por Alvarez y Steinbach (2009) se incrementó entre 5 y 18 veces la infiltración del suelo posteriormente al laboreo y dichas mejoras atribuibles al mismo desaparecieron luego de la primera cosecha. En contraposición a esto Soracco et al., (2009) indican no encontrar cambios en la infiltración posteriormente al laboreo. Esta variabilidad de respuestas obtenidas se puede deber a diversos factores. Spoor (2006) establece que dichos factores son el grado de impedancia para el crecimiento de las raíces y el movimiento del agua, la profundidad y espesor de las capas densificadas, sumado al efecto de la textura y estructura del suelo. También influye, el drenaje, los cultivos anteriores y posteriores al laboreo, las condiciones de humedad del suelo durante la aplicación del implemento, las condiciones climáticas posteriores a la labranza profunda, y las características y diseño del escarificador.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. DESCRIPCIÓN DEL SITIO Y DEL EXPERIMENTO

El experimento se realizó durante la zafra 2023-2024 dentro del experimento de largo plazo de rotaciones arroceras (Anexo A), instalado en el año 2012 y ubicado en la Unidad Experimental Paso de la Laguna (33° 14' S; 54° 22' O; 25 m s. n. m), a 28 km de la ciudad de Treinta y Tres. La temperatura media en los meses de verano es de 22,4 °C y en los meses de invierno 11,6 °C. La precipitación promedio anual es de 1336 mm con una gran variabilidad interanual y dentro de cada año, y la evapotranspiración potencial anual promedio es de 1005 mm, para una serie de datos que va desde 1984 hasta 2024 (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria [INIA], s.f.). Según la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay a escala 1:1.000.000, el experimento se ubica en la unidad de suelos La Charqueada, siendo el mismo clasificado como un Brunosol subeutrico lúvico. Estos suelos se caracterizan por ser oscuros, con alto contenido de materia orgánica, textura media y tener un horizonte argilúvico más desarrollado (Altamirano et al., 1976).

3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño utilizado fue de bloques completos al azar con un arreglo de parcelas divididas. La parcela mayor (12m x 20 m) representó una fase de la rotación, soja en ambas situaciones, en un caso de una rotación con arroz, cultivos de cobertura y pasturas correspondientes a la rotación R5 Sj1 y en el otro rotando solo con arroz y cultivos de cobertura correspondiente a la rotación R6 Sj (Tabla 1). En la parcela menor (20 m x 3 m) se evaluó el efecto de la descompactación subsuperficial, el riego suplementario y la combinación de ambos factores, más un tratamiento control (secano sin descompactación sobre siembra directa) como se muestra en la Figura 1.

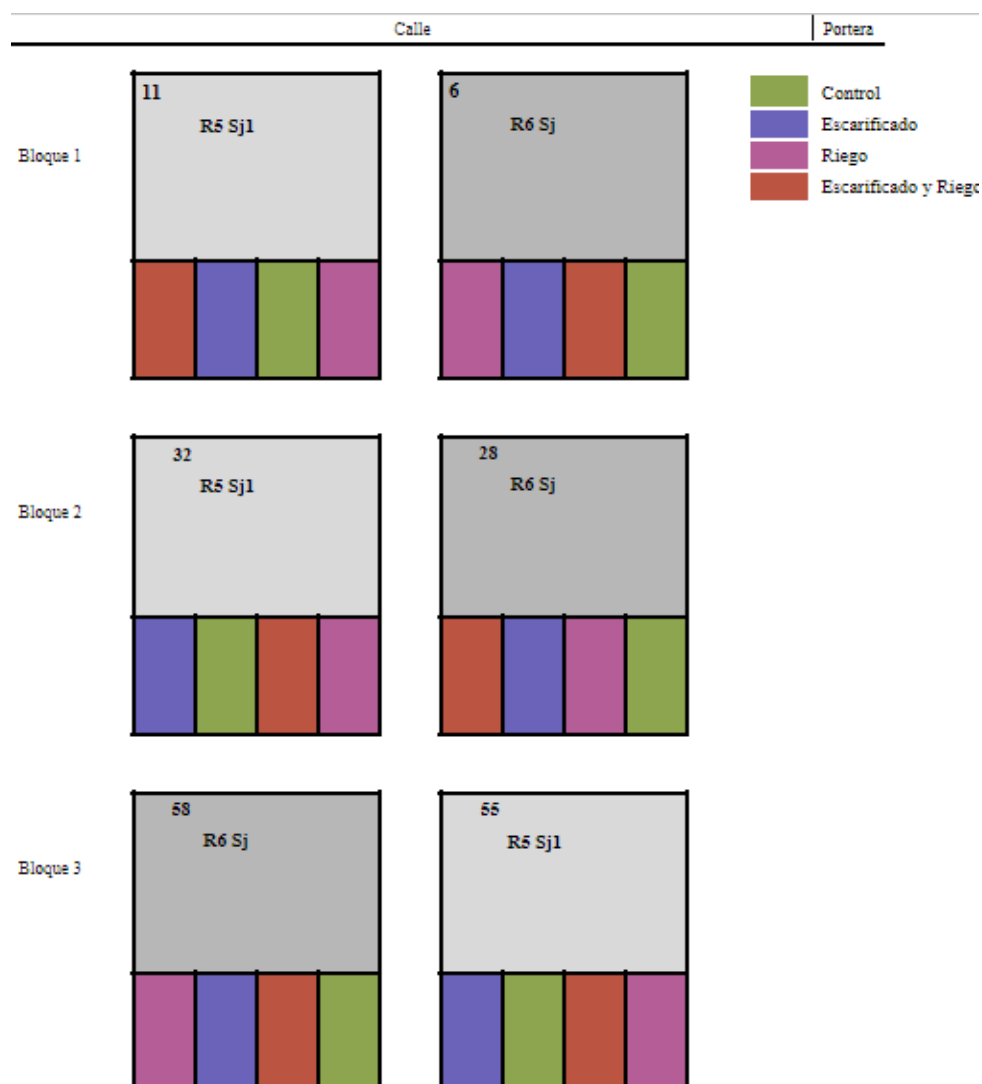
Tabla 1*Rotaciones contrastadas y su duración*

Rotación	Duración de la rotación (años)											
	1		2		3		4		5		6	
	PV	OI	PV	OI	PV	OI	PV	OI	PV	OI	PV	OI
5- Arroz-Soja-PP	Arroz	Rg	Soja 1	Rg	Soja	Ta	Arroz	PP	PP	PP	PP	PP
6- Arroz -Soja	Arroz	Rg	Soja	Ta								

Nota. Ta= Trébol alejandrino, Rg = Raigrás, PP= pastura permanente, PV=primavera/verano, OI= otoño/invierno.

Figura 1

Representación de las parcelas evaluadas con la disposición espacial de los tratamientos experimentales



3.3. MANEJO DEL CULTIVO

El 29 de noviembre se efectuó un laboreo vertical (escarificado) previo a la siembra mediante el uso de un escarificador Jan modelo matic 9, el cual tiene una distancia entre dientes de 30cm y trabaja a una profundidad de 25 cm aproximadamente. El mismo se utilizó solo en los tratamientos que lo contemplan.

El cultivo fue sembrado el 1° de diciembre de 2023, fecha relativamente tardía debido a las abundantes precipitaciones registradas durante el mes de noviembre (ver 4.1.1) que impidieron sembrar en fecha óptima. Debido a problemas de implantación, fue necesario resembrar todas las parcelas, realizándose esta tarea el 3 de enero de 2024. Para la resiembra, se optó por utilizar el cultivar DM 66R69 en todas las parcelas, este es un cultivar de grupo de madurez seis largo y crecimiento indeterminado.

A lo largo del ciclo del cultivo se realizaron las correspondientes fertilizaciones, donde el criterio de fertilización varía según la rotación. La rotación de agricultura continua (R6 Sj) se fertiliza por el criterio de reposición de lo extraído por el cultivo anterior, en este caso en base a las tablas del IPNI según el rendimiento alcanzado por el cultivo de arroz anterior con 13% de humedad base. En la rotación que incluye pasturas (R5 Sj1) el criterio de fertilización es el de nivel crítico. En este caso se realiza análisis de suelo, tomándose como nivel crítico un valor de 12 ppm de fósforo y 0,25 mEq/100g de potasio. En ambas rotaciones se aplicaron 75 kg ha⁻¹ de fertilizante 10-26/26-26+ 3S y 185 kg ha⁻¹ de 7-40/40-0 + 5S. Además, se aplicaron 55 kg ha⁻¹ y 61 kg ha⁻¹ de cloruro de potasio (0-0/0-60) a la R6 y R5 respectivamente. Los valores obtenidos en el análisis de suelo indican que, en relación al fósforo, la R5 Sj presentó un contenido de 5,0 µg P/g, mientras que la R6 Sj alcanzó los 13,0 µg P/g. En cuanto al potasio, se registraron 0,220 meq/100 g de suelo para la R5 Sj1 y 0,190 meq/100 g para la R6 Sj.

Por otro lado, los tratamientos de riego tuvieron un total de 5 momentos de aplicación del mismo durante a lo largo del ciclo. El riego se realizó por goteo mediante caños internos en las parcelas distribuidos cada dos líneas de siembra. El criterio de riego establecido fue que el agua no debía ser limitante, por lo que si no se registraban lluvias por un periodo de una semana se aplicaba una lámina de riego de 20 o 30 mm durante la fase vegetativa o reproductiva respectivamente.

La cosecha se llevó a cabo el 17 de mayo de 2024. La misma fue realizada con una cosechadora experimental autopropulsada Fotón y dentro cada parcela menor, correspondiente a los diferentes tratamientos, se cosecharon 30 metros cuadrados (2 m x 15 m) en cada una.

Finalmente, se realizó una caracterización climática de la zafra donde además de analizar la temperatura, radiación solar y precipitaciones durante el ciclo se analizó el comportamiento de agua en el suelo. Para este último se realizó un balance hídrico diferenciando los tratamientos con riego, donde se incorporó un aporte adicional de agua, y los tratamientos de secano, en los que la entrada de agua al sistema se produjo exclusivamente por precipitaciones. El mismo se realizó de forma diaria, para todo el largo del ciclo del cultivo partiendo del supuesto que el suelo se encontraba en capacidad de campo (60 mm aproximadamente según el tipo de suelo), dado que las precipitaciones de los meses anteriores superaban los promedios históricos. Posteriormente, se consideró el coeficiente de cultivo (K_c), la evapotranspiración del cultivo ($K_c \cdot ETP_0$), las precipitaciones efectivas y los riegos (en los tratamientos que le corresponden), todos estos obtenidos de la estación meteorológica del Paso de la Laguna. El Agua disponible (AD) en el suelo se calculó como la diferencia entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente, y a los valores obtenidos por debajo de este último se les asignó un valor de cero, considerando estos como días en el que cultivo se encontró en déficit hídrico.

3.4. DETERMINACIONES EN EL CULTIVO

La población de plantas se estimó mediante el conteo de plantas por metro lineal. Se realizaron cuatro muestreos dentro de cada parcela menor y se promediaron sus valores. También se tuvo en cuenta la distancia entre las hileras (0,5 m) para convertir dichos valores en número de plantas por unidad de superficie (n° plantas/ m^2).

Se realizaron lecturas de índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) por medio del instrumento GreenSeeker, un sensor de cultivos portátil, el cual se pasó por toda la parcela a una altura constante de 60 cm por encima del cultivo. Este índice permite estimar el estado de salud del cultivo mediante mediciones de intensidad de la radiación reflejada por el mismo (rojo e infrarrojo). El rango de valores para este índice se encuentra entre 0 y 1, donde los valores más cercanos a 0 indican suelo más desnudo y los más

cercanos a 1 corresponden a una vegetación más vigorosa y/o sana. Dichas determinaciones se realizaron en seis estadios diferentes: V4; R1; R4; R5; R6 y R7.

La cobertura vegetal se midió con la aplicación “Canopeo” (Patrignani & Ochsner, 2015). La misma cuantifica la fracción de cobertura vegetal verde en tiempo real. Para esto se tomaron tres fotografías por tratamiento en cada parcela menor, todas a una altura constante de 1,3 metros. Posteriormente, se promediaron las tres mediciones obteniendo un único valor de cobertura en cada parcela menor. Esta variable se midió en V4, R4 y R6.

La altura del cultivo fue medida con una regla de un metro colocada a nivel del suelo. Se realizaron tres mediciones por parcela menor las cuales fueron promediadas de igual manera a lo mencionado en el apartado anterior. Esta variable fue medida en los seis momentos previamente mencionados.

El índice Soil Plant Analysis Development (SPAD, de Konica Minolta) estima la cantidad de clorofila en las hojas. Al igual que las variables anteriores las determinaciones fueron tomadas in situ, y también se realizaron tres mediciones por parcela menor que fueron promediadas obteniendo un único valor, en cada uno de los seis momentos antes mencionados.

Para la estimación de biomasa se tomaron dos muestras cada medio metro lineal en cada parcela menor. Posteriormente, las muestras fueron secadas y pesadas para poder expresar los resultados en kilogramos de materia seca por hectárea. Esta variable también se midió en los mismos seis momentos que las variables anteriores.

Para determinar los componentes de rendimiento se realizaron muestreos a lo largo de un metro lineal, se contabilizó el número de plantas, vainas y granos, así como su peso. Los componentes estimados con estos datos fueron: número de granos por vaina, número de vainas por planta, número de granos por planta, número de plantas por metro cuadrado, número de granos por metro cuadrado y el peso de mil granos.

3.5. DETERMINACIONES EN SUELO

Para la evaluación del porcentaje de residuos en cobertura, se empleó un método que consiste en posicionar una regla sobre el suelo y realizar una estimación visual de la

proporción del suelo que se encuentra cubierto o desnudo. A mayor cantidad de centímetros de la regla con rastreo, mayor porcentaje de residuos en el suelo. Para el análisis de los datos se agruparon los tratamientos sin escarificado (control y riego) como grupo de control, mientras que se consideraron por otro lado los tratamientos con escarificado (escarificado y escarificado + riego).

Se midió la resistencia a la penetración (RP) del suelo utilizando un penetrómetro Eijkelkamp Penetrologger Viewer Vs. 6.08. Este equipo registra valores de RP en MPa cada un centímetro, los cuales fueron agrupados en rangos de 5 cm hasta los 50 cm y en rangos de 15 cm hasta los 45 cm para el posterior análisis. Las mediciones fueron realizadas en dos momentos: 55 días pos laboreo y 220 días pos laboreo. En forma complementaria, este instrumento permitió obtener los datos de humedad del suelo.

La infiltración fue estimada con el método de doble cilindro desarrollado por el United States Department of Agriculture ([USDA], 2001). Este consistió en saturar de agua una porción del suelo delimitada por dos anillos concéntricos donde el externo actúa reteniendo el agua para evitar movimiento lateral del agua en el perfil del suelo y no se pierda hacia los lados. Luego se procedió a medir la variación del nivel de agua en el cilindro interno durante un total de 60 minutos, donde las mediciones fueron tomadas cada 1 minuto durante los primeros 5 minutos, cada 5 minutos hasta los 15 minutos y cada 15 minutos hasta completar los 60 minutos. En el caso de que el agua desapareciera antes se agregaba nuevamente una lámina y volviendo a medir el tiempo que demoraba en infiltrar. Los datos se presentaron como infiltración acumulada (cm) y tasa de infiltración (cm h^{-1}). Las mediciones fueron realizadas en dos momentos: 55 días pos laboreo y 220 días pos laboreo.

Posterior a la cosecha, se midió la profundidad de la huella de la cosechadora como medida de alteración de suelo a modo de capturar posibles diferencias entre tratamientos con y sin escarificado. Esto se realizó utilizando una regla con un largo aproximadamente igual al ancho de cada parcela (3 m), marcada cada 5cm y colocada sobre el suelo indicando el nivel del mismo. Con otra regla, utilizada de manera perpendicular a la anterior, se midió la profundidad de la huella con respecto al nivel del suelo.

3.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para evaluar el efecto de la rotación y de los tratamientos se realizaron análisis de varianza y para la comparación entre los tratamientos se realizó comparación de medias a partir de la diferencia mínima significativa (DMS) con la prueba de Tukey. Para esto se usaron niveles de significancia de $\alpha = 0,1$. Además, se probaron los supuestos del modelo, tales como el de distribución normal mediante la prueba de Shapiro-Wilks, gráfico de QQ plot y residuos vs predichos así como la homogeneidad de varianzas a través del Test de Levene.

El modelo propuesto para el análisis estadístico fue el siguiente modelo lineal mixto:

$$y_{ijkl} = \mu + \beta_i + R_j + (\beta * R)_{ij} + T_k + (R * T)_{jk} + \varepsilon_{ijkl}$$

Donde:

- Y_{ijkl} , es el valor observado de la variable de respuesta
- μ , es la media general del experimento
- β_i , efecto del i-ésimo bloque ($i=1,2,3$)
- R_j , efecto de la j-ésima rotación ($j=1,2$)
- $(\beta * R)_{ij}$, es la interacción bloque por rotación (error de parcela grande), donde se testeó el efecto rotación
- T_k , efecto del k-ésimo tratamiento ($k=1,2,3,4$)
- $(R * T)_{jk}$, efecto de la interacción rotación por tratamiento
- ε_{ijkl} , error residual

La hipótesis nula planteada para el análisis de varianza es que no existen diferencias entre los tratamientos estudiados sobre la variable de respuesta, mientras que la hipótesis alterna es que al menos un tratamiento difiere de los demás.

H_0 : todos los tratamientos son iguales.

H_a : al menos un tratamiento difiere de los demás.

Además se realizó un análisis de regresión, entre la resistencia a penetración y productividad.

Tanto el análisis estadístico como los gráficos presentados se realizaron con los paquetes “tidyverse”; “nlme”; “emmeans”; “multcompview”; “car”; “skimr”; “multcomp”; “readxl” del programa R studio versión 4.4.1.

Para las variables Infiltración, NDVI, Cobertura, Altura, SPAD, Biomasa y Huellado no se realizó análisis estadístico, sino que los gráficos que se presentan a continuación son descriptivos.

4. RESULTADOS

4.1. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE LA ZAFRA

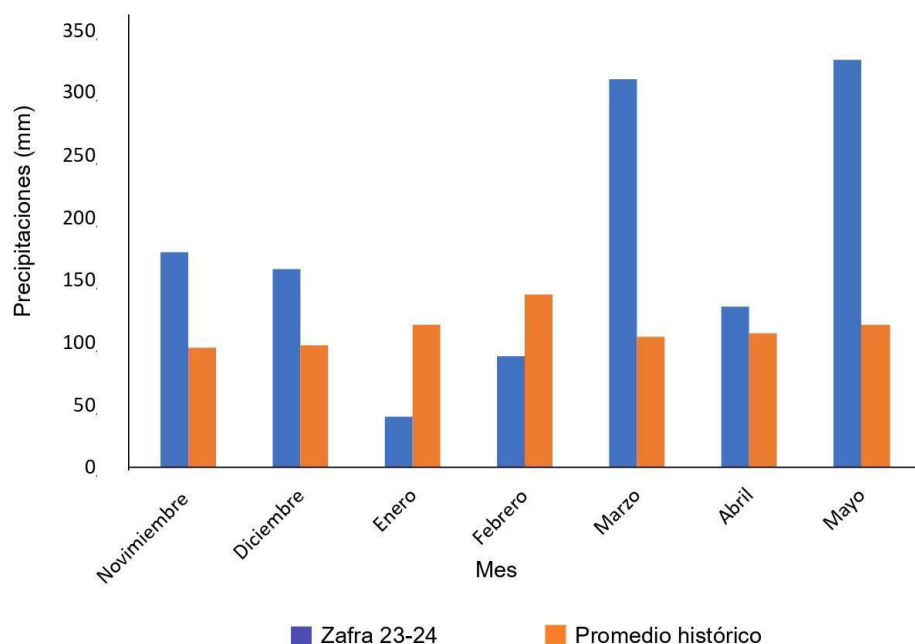
Se presentan la información temperatura media; heliofanía y precipitaciones registrada en la estación meteorológica de la Unidad Experimental Paso de la Laguna, ubicada en Treinta y Tres durante los meses que abarca el ciclo del cultivo.

4.1.1. PRECIPITACIONES

Desde el 29 de noviembre de 2023 hasta el 17 de mayo de 2024 se registró un valor de precipitaciones acumuladas de 1056 mm. En los meses de enero y febrero las precipitaciones se ubicaron 76% y 65% por debajo de la media histórica respectivamente (115 mm y 140 mm para enero y febrero respectivamente). Por otro lado, la mayor proporción de este volumen se concentró en los meses de marzo y mayo, durante el periodo de vaina completa (R4) y previo a la cosecha (R8), siendo éste 146% y 100% superior a la media histórica respectivamente (Figura 2).

Figura 2

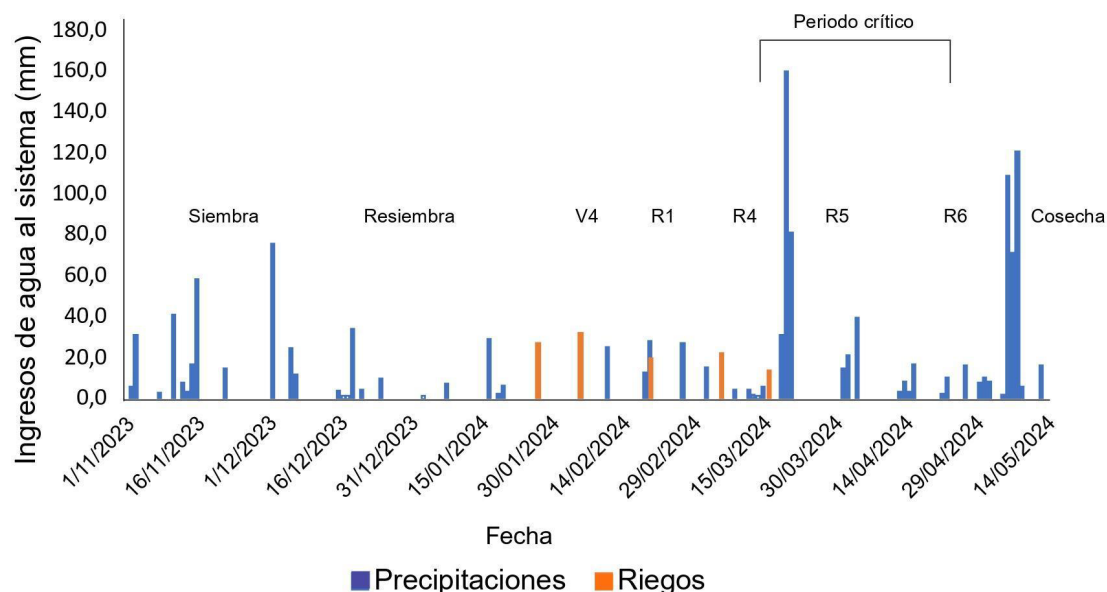
Precipitaciones acumuladas mensuales



A continuación, se presenta la distribución de las precipitaciones y el riego a lo largo del ciclo del cultivo, destacándose las precipitaciones elevadas previas a la cosecha y la aplicación estratégica de los riegos en períodos de escasez de lluvias.

Figura 3

Distribución de las precipitaciones y riego a lo largo del ciclo del cultivo

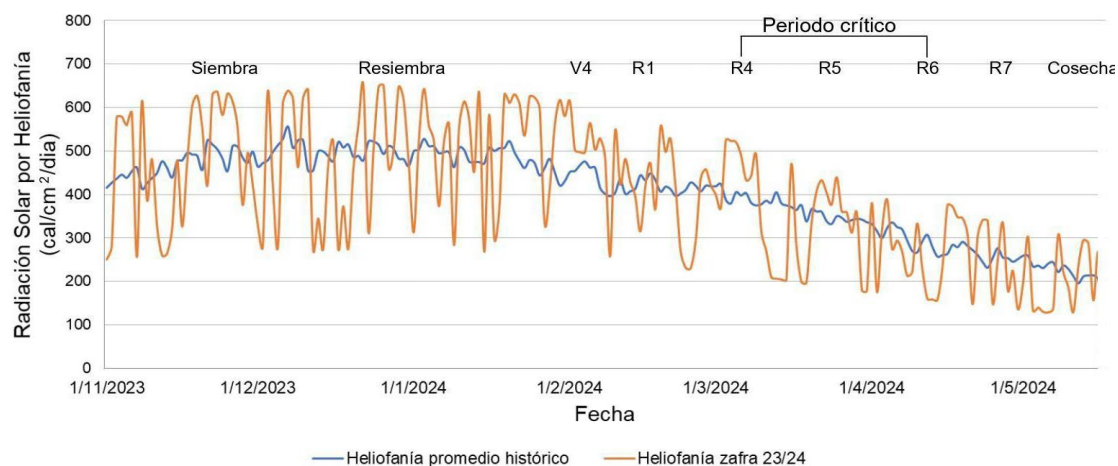


4.1.2. RADIACIÓN SOLAR

La evolución de la radiación solar a lo largo del ciclo del cultivo siguió la tendencia histórica, disminuyendo hacia el final del ciclo (meses de otoño). Es posible destacar ciertos momentos de reducción significativa de la radiación solar, que coincidió con las altas precipitaciones en dichos momentos. Los meses con mayor variabilidad fueron mayo, donde la heliofanía promedio fue 13% menor al promedio histórico, y marzo junto con diciembre obteniendo 4% menos radiación en relación al promedio histórico.

Figura 4

Radiación solar durante el ciclo del cultivo en comparación con el promedio histórico (últimos 30 años)

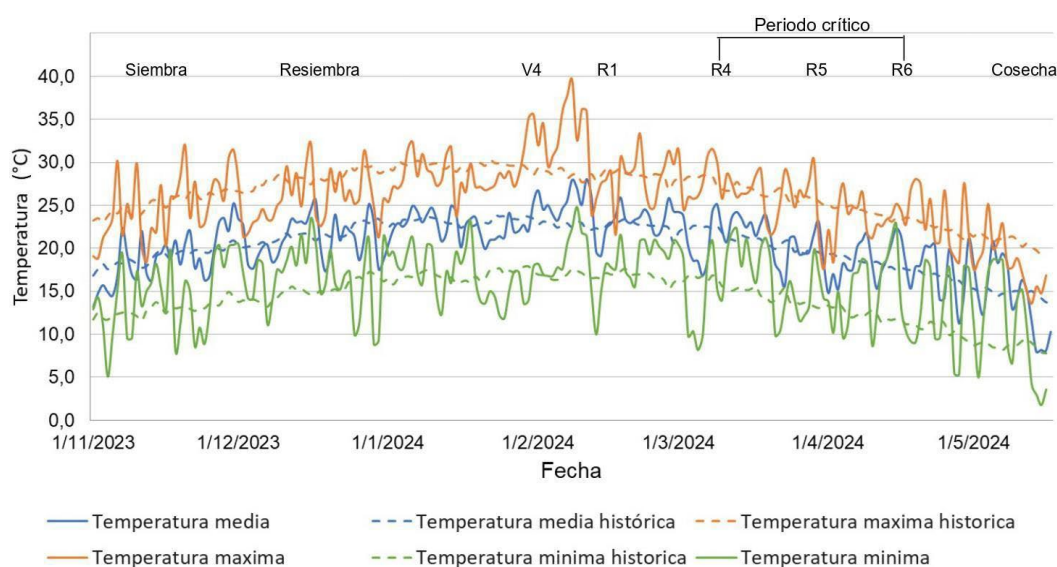


4.1.3. TEMPERATURA

Las temperaturas en la zafra fueron similares a los registros históricos aunque presentaron algunas fluctuaciones. En el mes de febrero se destacan las temperaturas máximas que superaron al promedio histórico en aproximadamente 7%, alcanzando valores cercanos a los 40°C. Por otro lado, en el mes de marzo, momento en el cual comienza el periodo crítico, las temperaturas mínimas registradas fueron en promedio 5°C menores al promedio histórico.

Figura 5

Temperatura máxima, media y mínima durante el ciclo del cultivo en relación al promedio histórico

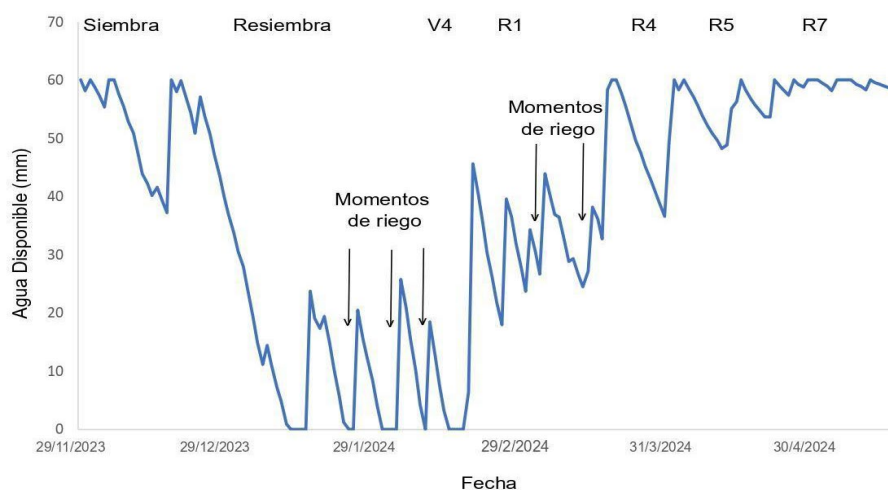


4.1.4. AGUA DISPONIBLE

En los tratamientos con riego, en el total del ciclo el cultivo tuvo 14 días de déficit hídrico. Esto no significó la ausencia de agua en el suelo, sino que la misma estaba debajo del punto de marchitez permanente (no disponible para el cultivo). En el total del ciclo del cultivo se aplicaron en promedio 110 mm de agua. Además, no se detectó ningún día de déficit hídrico durante el PC (Figura 6).

Figura 6

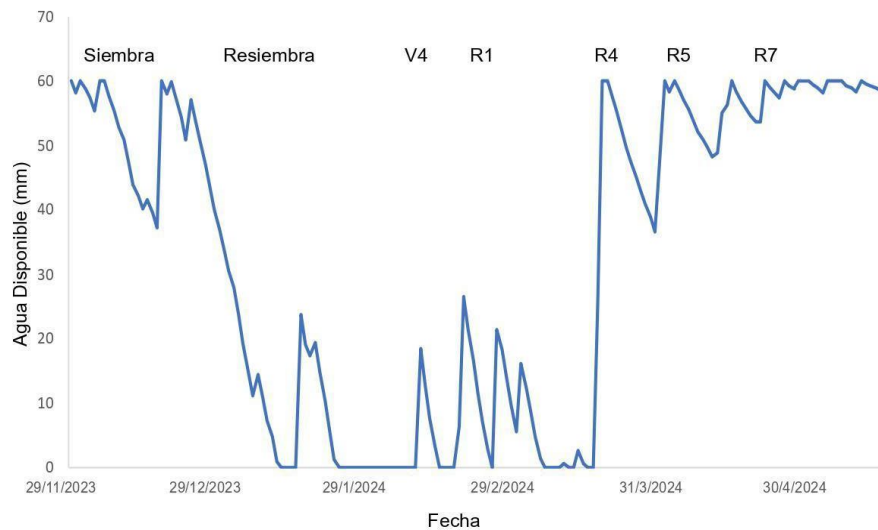
Evolución del agua disponible durante el cultivo de soja en los tratamientos con riego



Por otro lado, en los tratamientos sin riego, se detectaron 34 días de déficit hídrico en el total del ciclo donde 7 de estos pertenecieron a los primeros días del PC.

Figura 7

Evolución del agua disponible durante el cultivo de soja en los tratamientos sin riego



4.2. VARIABLES AGRONÓMICAS DE INTERÉS

Se presentan los datos de estadística descriptiva de las principales variables estudiadas.

Tabla 2

Estadística descriptiva de las variables analizadas

	Media	Desvío estándar	CV (%)	Rango
NDVI	0,81	0,04	4,34	0,13
Cobertura (%)	74,2	11,9	16,1	41,2
Altura R6 (cm)	69,5	6,0	8,7	19,0
SPAD	40,3	9,9	24,5	48,6
Materia seca R6 (kg/ha)	4960,8	1247,5	25,1	4200,0
Residuos (%)	79,7	18,9	23,7	70,0
Población (n plantas/m²)	25,5	7,4	29,0	27,8
N vainas/planta	59,9	17,8	29,7	73,9
N granos/vaina	2,4	0,3	14,7	1,2
N granos/planta	138,4	36,4	26,3	139,4
N plantas/m²	17,0	4,0	23,5	14,0
N granos/m²	2262,0	542,2	23,9	2366,0
Peso 1000 granos (g)	95,6	6,8	7,1	30,5
Rendimiento (kg/ha)	2312,3	477,5	20,6	2042,0
RP 0-15 cm 55 días poslaboreo (MPa)	0,9	0,1	16,5	0,31
RP 15-30 cm 55 días poslaboreo (MPa)	1,1	0,02	2,3	0,04
RP 30-45 cm 55 días poslaboreo (MPa)	1,4	0,07	8,3	0,16
RP 0-15 cm 220 días	0,9	0,2	20,9	0,4

poslaboreo (MPa)

RP 15-30 cm 220 días poslaboreo (MPa)	1,4	0,1	13,4	0,3
RP 30-45 cm 220 días poslaboreo (MPa)	1,8	0,1	13,1	0,3

Nota. El rango está establecido como la diferencia entre el valor máximo y mínimo observado para cada variable de respuesta. Las variables población y n°plantas/m² fueron estimadas en distintos momentos y muestreos, donde la segunda es en base a los muestreos para la estimación de componentes de rendimiento.

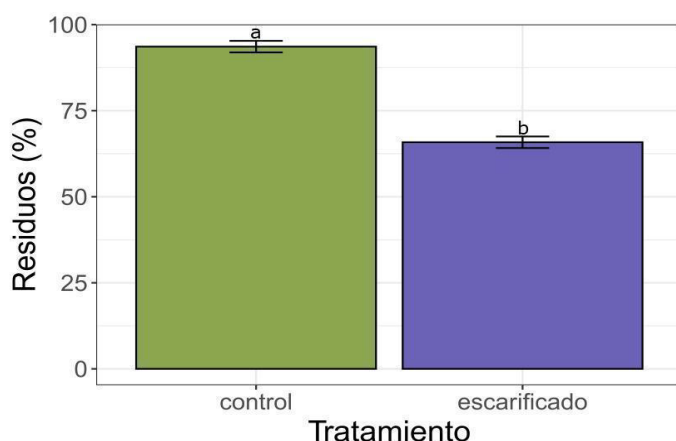
4.3. DETERMINACIONES A NIVEL DE SUELO

4.3.1. RESIDUOS

La cantidad de residuos vegetales que permanecieron en superficie posterior al laboreo vertical disminuyó aproximadamente 30% respecto a los tratamientos sin laboreo. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre las rotaciones, lo que sugiere que el efecto del escarificado es independiente de la rotación.

Figura 8

Porcentaje de residuos en superficie según tratamiento en estadios iniciales del cultivo de soja (V3-V4)



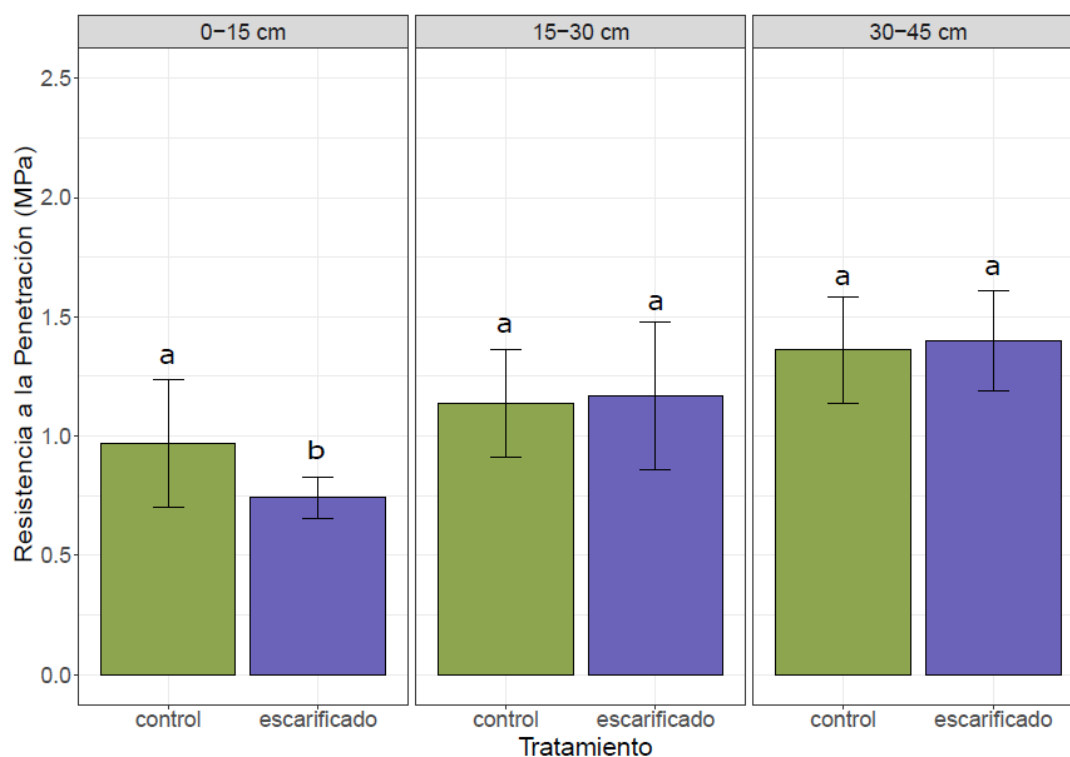
4.3.2. RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN

Se encontraron diferencias entre tratamientos previo a la siembra, para la profundidad de 0-15 cm, no siendo así para las demás profundidades evaluadas. Para la

primera profundidad, la resistencia a la penetración fue 23% menor en el tratamiento escarificado respecto al control (0,97 MPa).

Figura 9

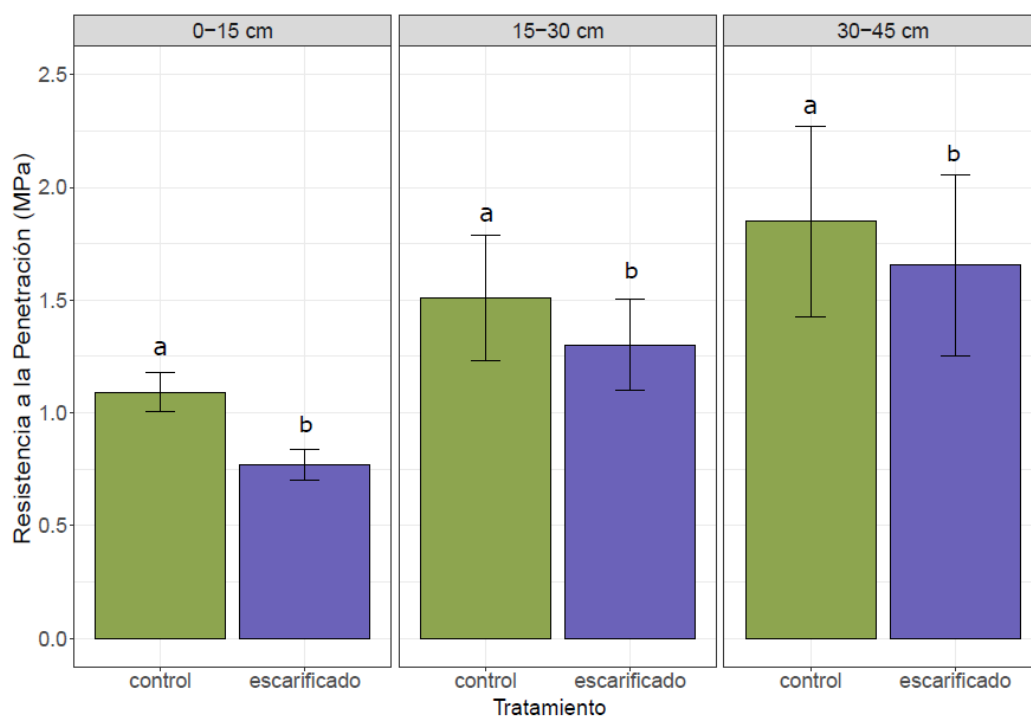
RP en el perfil del suelo previo a la siembra (55 días pos laboreo)



Por otro lado, posterior a la cosecha, se observaron diferencias entre tratamientos en todas las profundidades estudiadas (Figura 13). Además, las diferencias se mantuvieron entre los 30 y 45 cm, siendo esta una profundidad mayor a la que trabaja la herramienta de laboreo. Para el rango de 0-15 cm el valor promedio fue 1,09 MPa para el control y 0,77 MPa para el escarificado, indicando una reducción en la resistencia a la penetración de 30%. Para los rangos entre 15-30 y 30-45 cm, el escarificado disminuyó la resistencia a la penetración en un 14 y 11% respectivamente.

Figura 10

RP en el perfil del suelo medida en forma posterior a la cosecha (220 días pos laboreo)

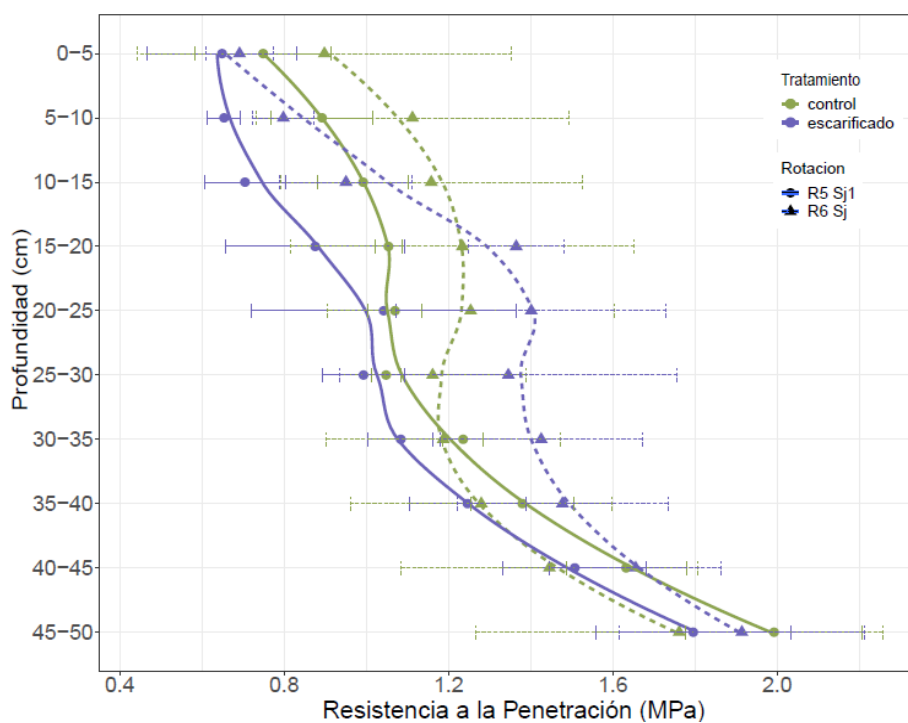


No se detectaron diferencias significativas entre rotaciones en ninguno de los dos momentos de medición (Figura 11 y 12). Previo a la siembra, la rotación que incluye pasturas (R5 Sj1), pareció tener una resistencia a la penetración menor en comparación con la rotación de agricultura continua (R6 Sj) (ver figura 11).

Por otro lado, el comportamiento entre rotaciones se mantiene similar posterior a la cosecha, donde la rotación que incluye pasturas (R5 Sj1) parecería ser la más estable en el tiempo y mantener los valores más bajos de resistencia a la penetración (ver Figura 12).

Figura 11

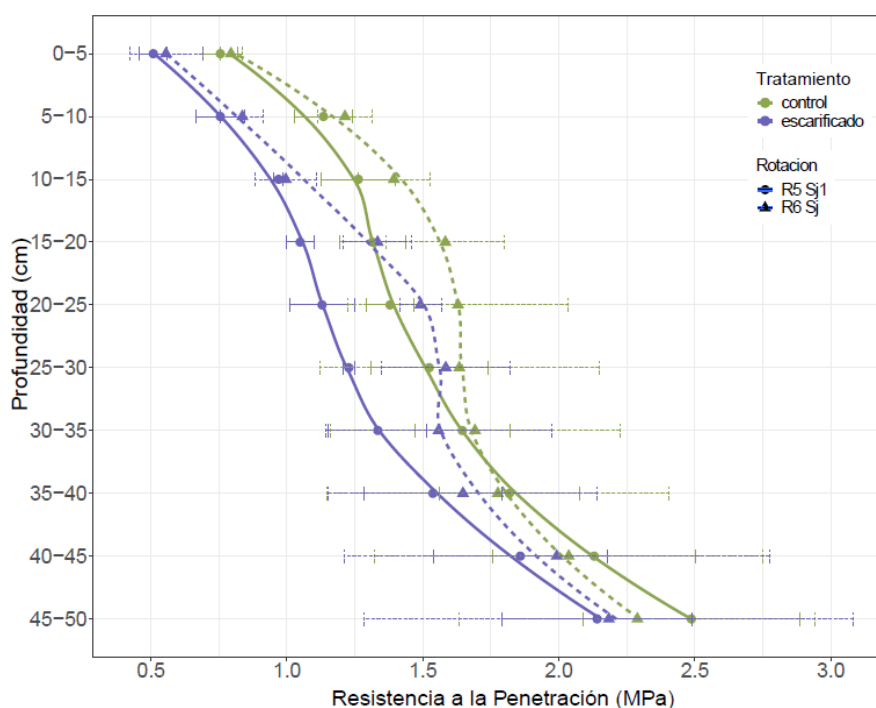
RP del suelo según tratamiento y rotaciones, previo a la siembra (55 días pos laboreo)



Nota. R5 Sjl hace referencia a la rotación con pasturas mientras que R6 Sjl hace referencia a la rotación sin pasturas.

Figura 12

RP del suelo según tratamiento y rotaciones, posterior a la cosecha (220 días pos laboreo)

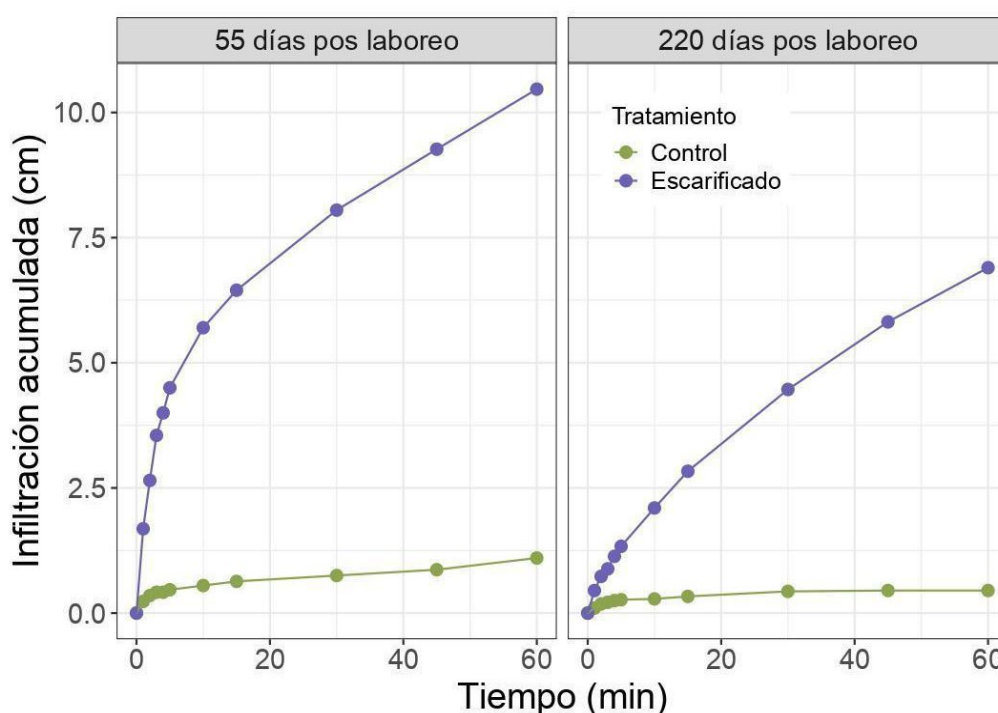


4.3.3. INFILTRACIÓN

Se observó que los tratamientos con escarificado presentaron una infiltración considerablemente mayor a lo largo de todo el periodo evaluado (60 minutos). Además, el efecto del laboreo pareció mantenerse en el tiempo, ya que a los 220 días continuaron exhibiendo una mayor infiltración frente al control. Sin embargo, al comparar los dos momentos, 55 días y 220 días pos laboreo, se evidenció una disminución en la infiltración, registrando aproximadamente un 35% menos de infiltración a los 60 minutos en el segundo momento respecto al primero (ver Figura 13).

Figura 13

Infiltración acumulada para los diferentes tratamientos medido en dos momentos



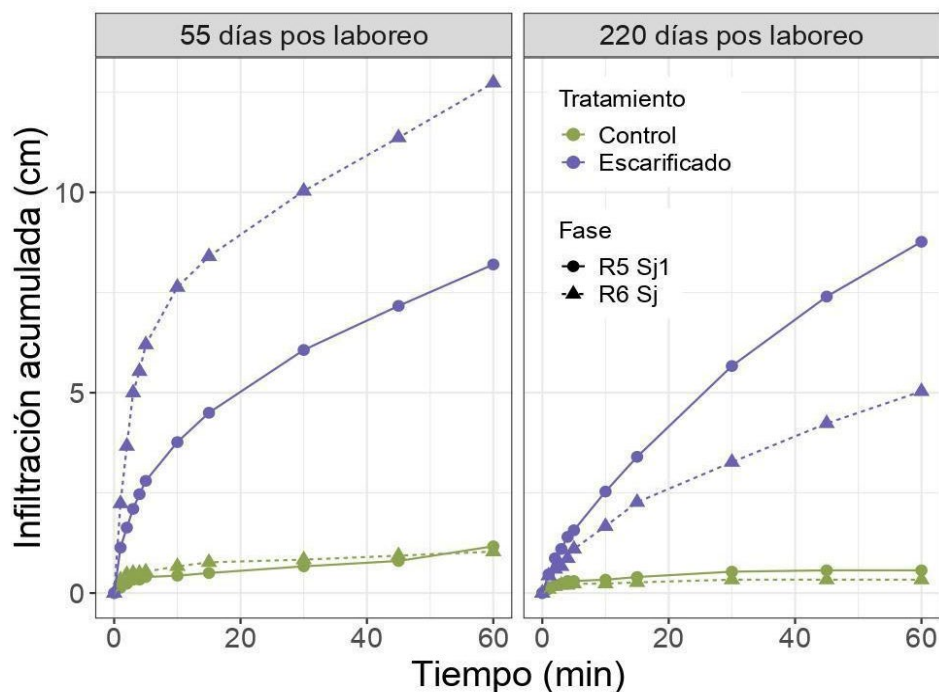
Se observó que al comparar las rotaciones 55 días pos laboreo, la rotación que no incluía pasturas la rotación de agricultura continua (R6 Sj), exhibió una mayor respuesta a la pasada del escarificador, mostrando una infiltración mayor. Sin embargo, a los 220 días pos laboreo, el cual fue posterior a la cosecha, se evidenció una disminución considerable en la infiltración, lo que indica que el efecto del escarificador se redujo más rápidamente en los sistemas de agricultura continua (ver Figura 14).

Por otro lado, en la rotación que incluye pasturas (R5 Sj1), aunque el efecto del escarificado en base a la infiltración no es tan elevado a los 50 días posterior al laboreo

como en la rotación de agricultura continua (R6 Sj), se observó que logra mantener la infiltración en el tiempo de manera más efectiva.

Figura 14

Infiltración acumulada para los diferentes tratamientos y rotaciones, medido en dos momentos



Nota. R5 Sj1 hace referencia a la rotación con pasturas mientras que R6 Sj hace referencia a la rotación sin pasturas.

En todas las situaciones evaluadas, al cabo de 60 minutos la rotación que incluye pasturas (R5 Sj1) mostró una mayor infiltración que la rotación de agricultura continua (R6 Sj), tanto en el tratamiento de escarificado como el control.

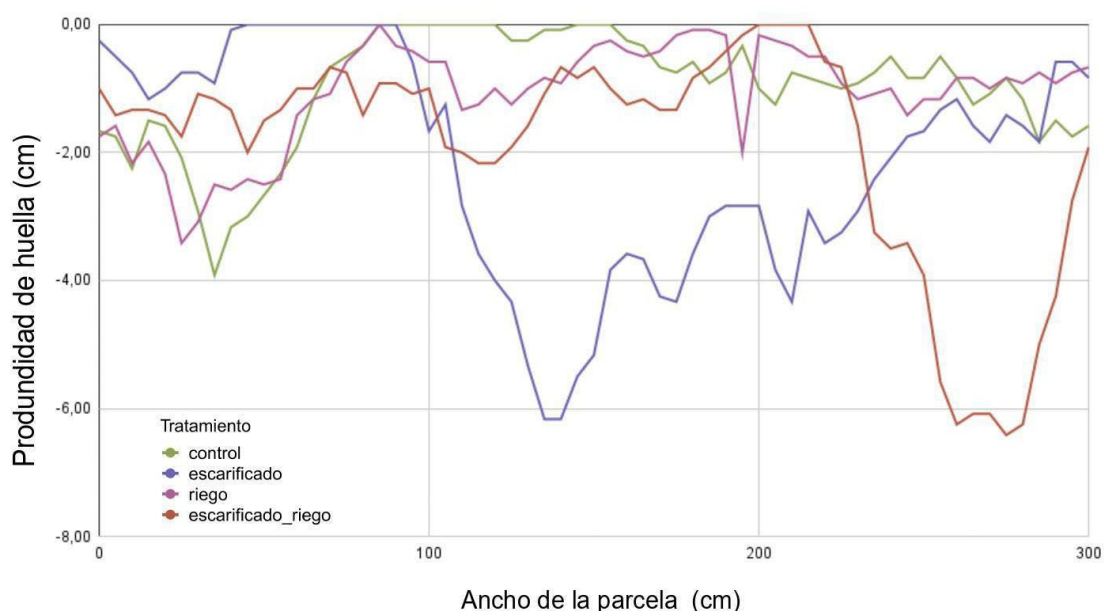
A su vez, se observó que el desvío estándar fue mayor en los tratamientos con escarificado, lo que sugiere una mayor variabilidad en los resultados obtenidos. Esto podría implicar que, aunque el escarificado aumenta la infiltración, los resultados son más inconsistentes en comparación con los tratamientos control.

4.3.4. HUELLADO

Fue posible observar como la profundidad de la huella de la cosechadora resultó en promedio 50% mayor en aquellos tratamientos que tuvieron escarificado en comparación con los que no lo tuvieron (ver Figura 15).

Figura 15

Huellado del terreno por causa del pasaje de la cosechadora medido en cada tratamiento



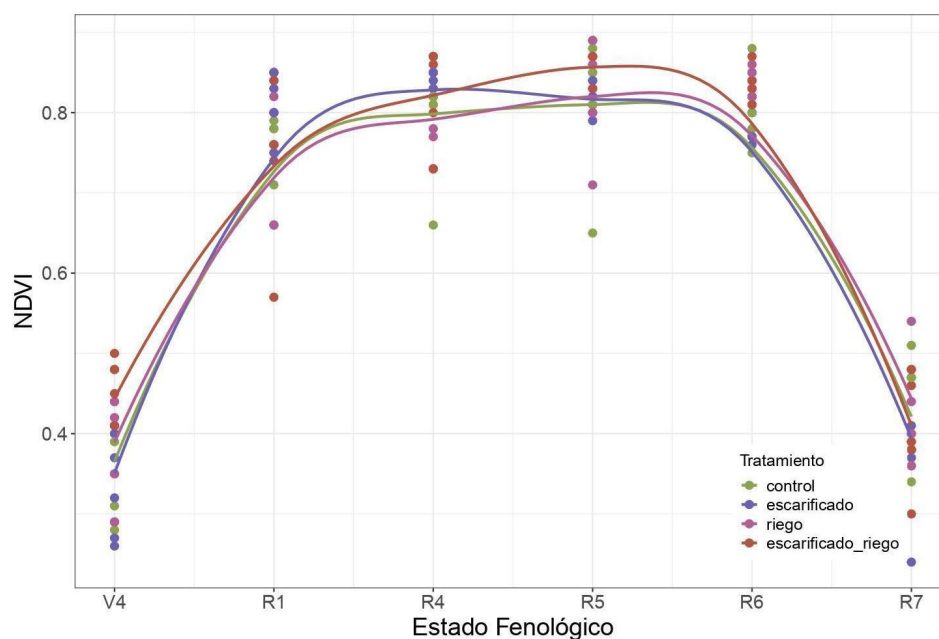
4.4. RESULTADOS DE DETERMINACIONES EN CULTIVO

4.4.1. NDVI

Para todos los tratamientos se observó un incremento en el NDVI hasta alcanzar la etapa reproductiva (R1), seguido de un periodo de estabilización en los valores del índice (en torno a 0,8, decreciendo finalmente a partir de R6 (en torno a 0,4). Este comportamiento final coincidió con la disminución en la acumulación de materia seca dado que a partir de esta fase las hojas del cultivo comienzan a senescer. El tratamiento escarificado + riego parecería tener los valores más altos de NDVI a lo largo del ciclo (ver Figura 16).

Figura 16

Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) durante el ciclo del cultivo en los diferentes tratamientos

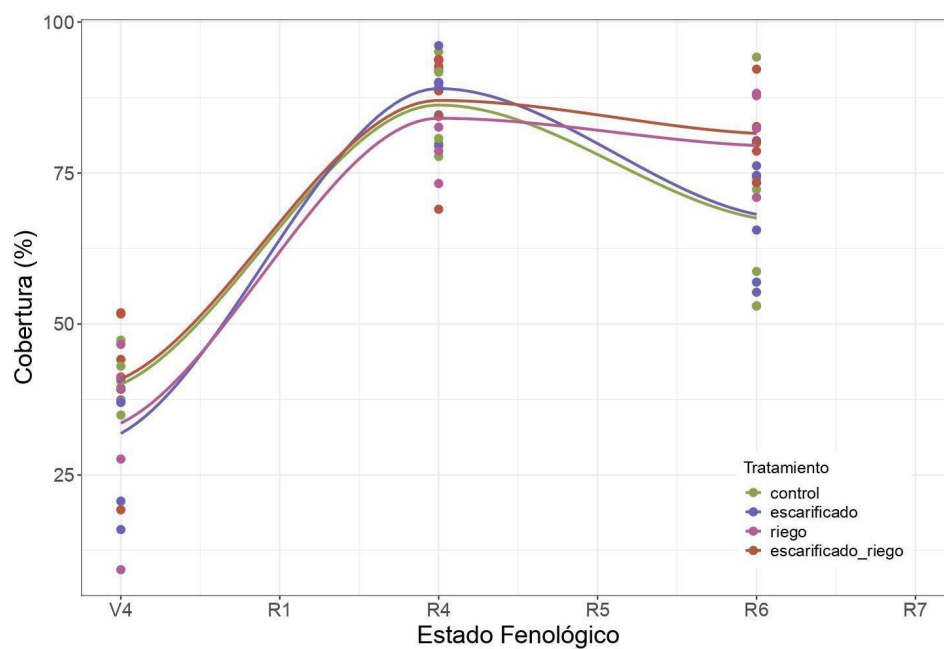


4.4.2. COBERTURA DEL CULTIVO

En las primeras etapas fenológicas, la cobertura del cultivo respecto a la superficie del suelo fue relativamente baja, alrededor del 50%. Sin embargo, se observó un rápido aumento en la cobertura entre los estadios V4 y R1. Durante los estadios R4 y R5, el porcentaje de cobertura alcanzó su máximo, situándose entre el 80% y el 90% (ver Figura 17). Este comportamiento coincide con el supuesto de que en R5 se obtiene el máximo Índice de Área Foliar (IAF) del cultivo de soja. Los tratamientos con riego mostraron una ventaja, reflejando un comportamiento similar al de la altura (ver Figura 18) y la acumulación de biomasa (ver Figura 20). A partir de R6, la cobertura comenzó a disminuir en todos los tratamientos; no obstante, es interesante destacar que los tratamientos con riego parecieron mantener una mayor cobertura en R7 en comparación con los demás tratamientos. En base a la tendencia observada, es posible que de haberse continuado con el análisis, los valores de cobertura fuesen aún más bajos, asociados a la senescencia de las hojas, especialmente en R8.

Figura 17

Porcentaje de cobertura según estado fenológico para los diferentes tratamientos

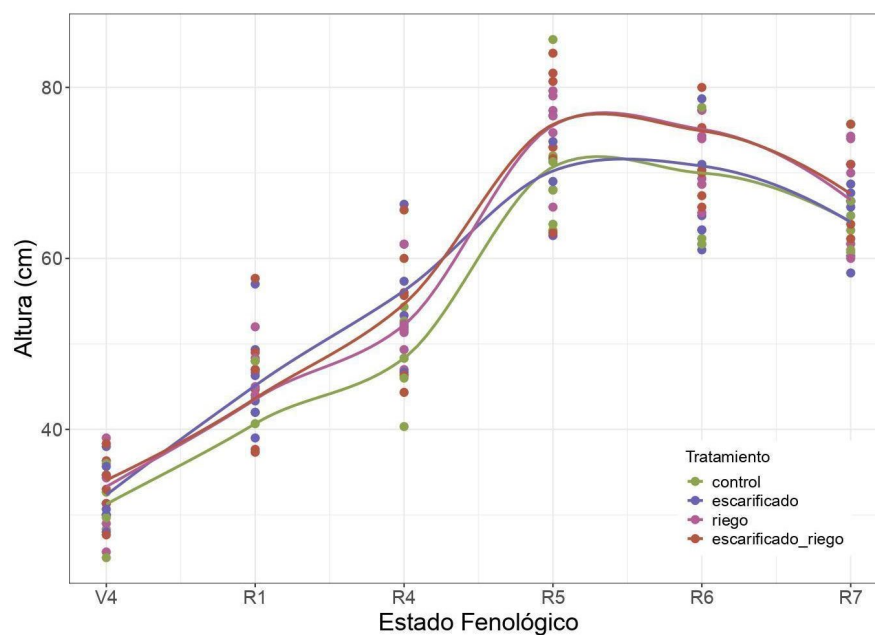


4.4.3. ALTURA DE PLANTA

En R5, el cultivo alcanzó la altura máxima en todos los tratamientos. Es relevante destacar que los tratamientos que incluyeron riego mostraron una altura aproximadamente 5% mayor en comparación con aquellos que no contaron con esa práctica de manejo (ver Figura 18).

Figura 18

Altura de planta (cm) del cultivo de soja según estado fenológico para cada tratamiento

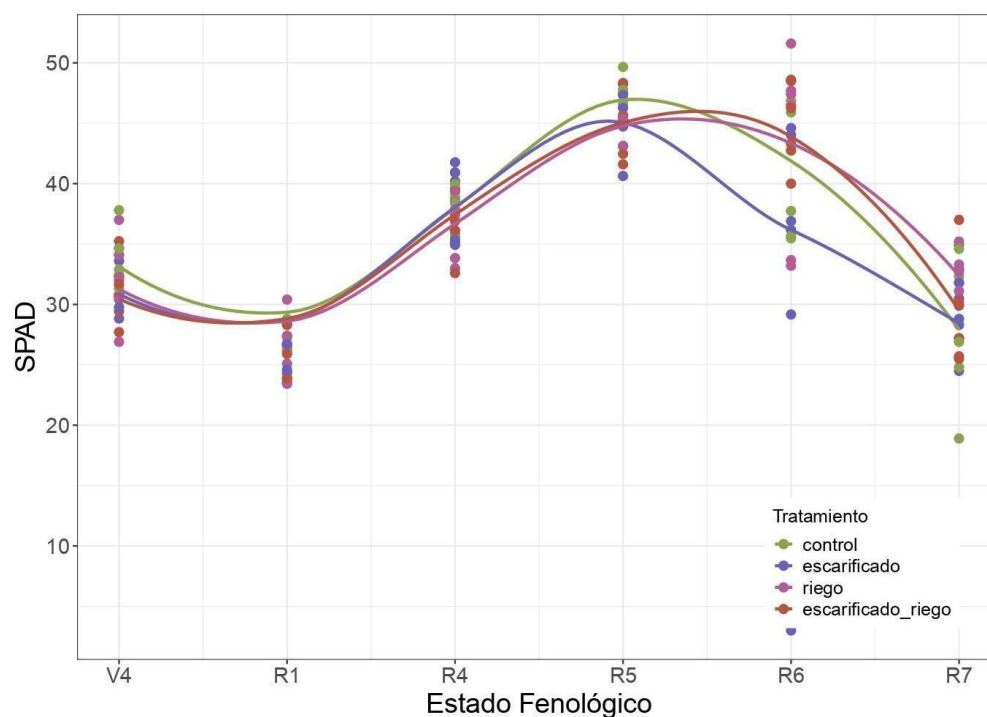


4.4.4. SPAD

Es posible notar que los valores de SPAD oscilaron entre 20 y 50. El SPAD aumentó a lo largo de las primeras etapas fenológicas, alcanzando un máximo en R5-R6, para luego disminuir, lo cual coincide con la senescencia de las hojas (Figura 19). Los tratamientos de laboreo mostraron comportamientos similares; sin embargo, se observó que los tratamientos con riego presentaron valores de SPAD ligeramente superiores durante el periodo cercano a R6, momentos fundamentales en la determinación del rendimiento.

Figura 19

Valores de SPAD a lo largo del ciclo del cultivo según tratamientos

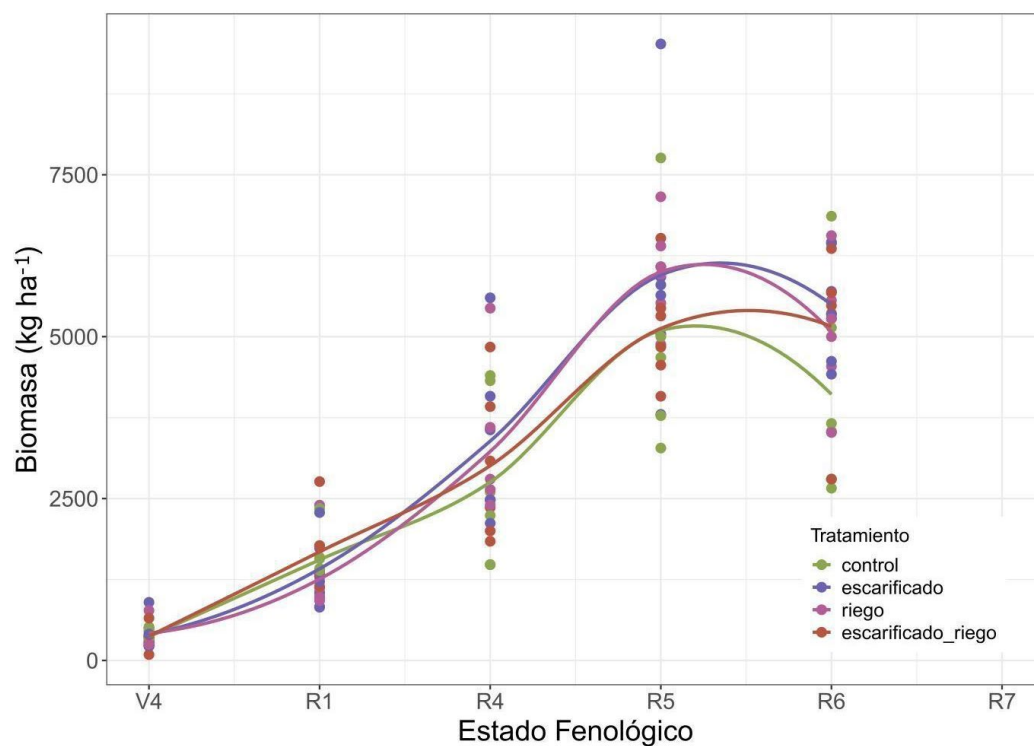


4.4.5. BIOMASA

A lo largo del ciclo del cultivo, la biomasa aumentó progresivamente, alcanzando un máximo en las etapas R5 o R6, para luego disminuir. Los tratamientos de “escarificado” y “riego” tendieron a generar la mayor biomasa durante casi todas las etapas, especialmente entre R4 y R6. En contraste, el tratamiento de control presentó la menor biomasa a lo largo de la mayor parte del ciclo fenológico. En el último muestreo (R6), se observó que todos los tratamientos, a excepción del control, obtuvieron valores similares. Cabe destacar que existió una dispersión considerable entre los datos, sobre todo en etapas avanzadas del ciclo (ver Figura 20).

Figura 20

Biomasa (kg ha^{-1}) según estado fenológico para los diferentes tratamientos



4.4.6. COMPONENTES DE RENDIMIENTO

No se encontraron diferencias en los componentes de rendimiento entre tratamientos, a excepción del número de plantas por metro cuadrado (n° plantas/ m^2) el cual fue mayor en el tratamiento escarificado respecto al control (Tabla 3).

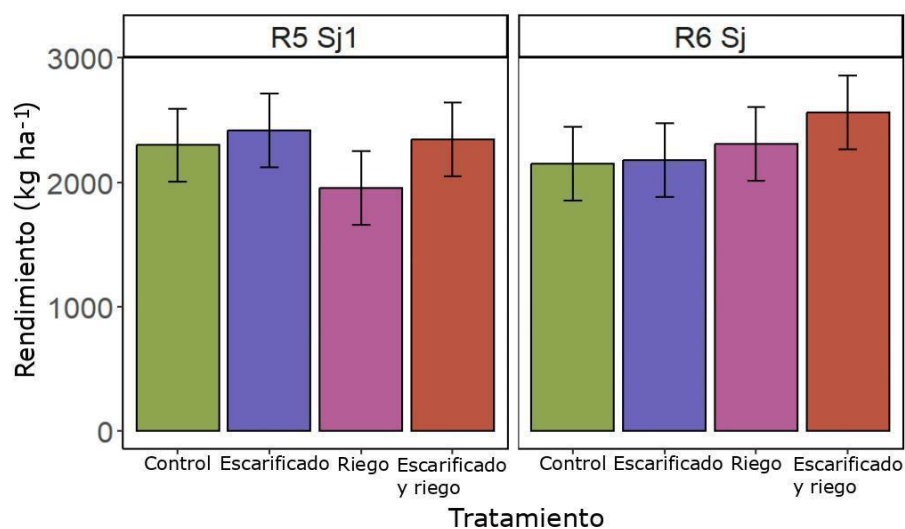
Tabla 3*Componentes de rendimiento de soja*

Tratamiento	Nº granos/m2	Peso mil granos (g)	Nº plantas/m2	Nº granos/ planta	Nº vainas/ planta	Nº granos/ vaina
Control	2316,7	96,8	28,3b	130,3	60,4	2,1
Escarificado	2400,0	95,1	22,1 a	127,2	55,6	2,3
Riego	2209,7	93,6	23,9 ab	155,9	63,5	2,5
Escarificado + riego	2125,0	96,6	27,6 ab	149,1	60,0	2,4
Media general	2262	95,6	25,5	138,4	59,9	2,3
Significancia	NS	NS	*	NS	NS	NS

Nota. *Significativo para un p-valor $\leq 0,1$. NS= no significativo.

4.4.7. RENDIMIENTO

El rendimiento medio del experimento fue de 2278 kg ha⁻¹. No se encontraron diferencias en rendimiento asociadas a las rotaciones, ni entre tratamientos (Figura 21). Los tratamientos que incorporan escarificado, presentan un menor desvío estándar en los rendimientos obtenidos, lo que indica una mayor homogeneidad en los resultados. En promedio para todos los tratamientos, se obtuvo un índice de cosecha de 0,44.

Figura 21*Rendimiento de soja según rotación y tratamiento*

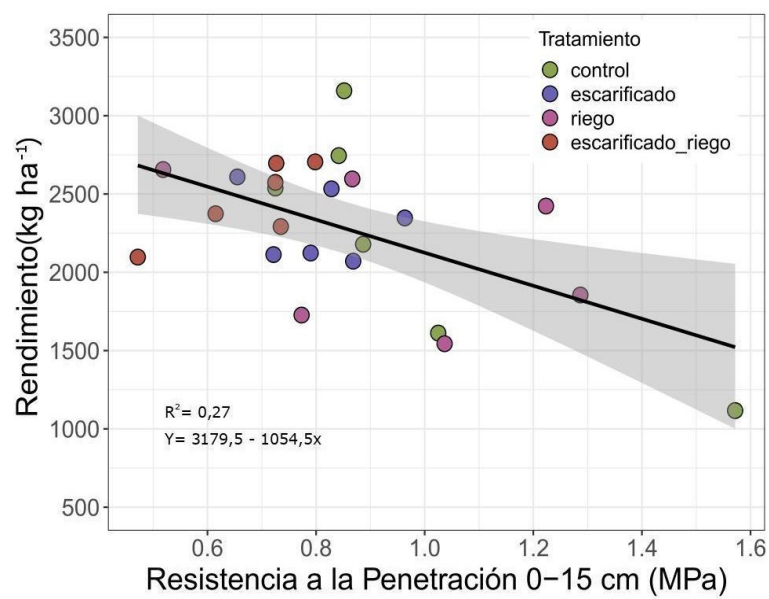
Nota. R5Sj1= rotación 5 (incluye pasturas); R6Sj = rotación 6 (agricultura continua).

4.4.8. EFECTO DE LA RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN SOBRE LA PRODUCTIVIDAD LOGRADA

Se observó una relación lineal negativa ($P=0,1$) entre el rendimiento y la resistencia a la penetración (RP) hasta una profundidad de 15 cm. El modelo ajustado mostró una disminución de 100 kg ha^{-1} de rendimiento de grano por cada $0,1 \text{ MPa}$ de RP, estando la variabilidad en el rendimiento explicada por este parámetro en un 30%. Para este análisis se utilizaron los datos del primer momento de medición, para el rango de 0-15 cm de profundidad dado que fue en el cual se evidenciaron diferencias significativas.

Figura 22

Relación entre el rendimiento y resistencia a la penetración



5. DISCUSIÓN

Durante el periodo experimental, entre diciembre y mayo, la precipitación efectiva en el cultivo de soja fue de 1056 mm, valor que, como lo mencionado por Sawchik et al. (2013), supera ampliamente a los requerimientos hídricos del cultivo para lograr altos rendimientos, el cual se encuentra alrededor de los 500 mm. Además, no se constató déficit hídrico durante el PC en los tratamientos bajo riego y fueron muy pocos los días de déficit en los tratamientos de secano, por lo que se podría decir que las demandas en dicho momento de altos requerimientos fueron en su mayoría satisfechas (Figuras 6 y 7). Finalmente, Giménez et al. (2014) mencionan que, como consecuencia de las elevadas precipitaciones durante el ciclo del cultivo, el mismo intercepta menor radiación solar incidente debido a la mayor cantidad de días nublados.

Por otro lado, la ubicación temporal del PC se vio afectada por la fecha de siembra, la cual se puede definir como tardía para un cultivo de primera. Como mencionan Coll et al. (2011, como se cita en Lafluf et al., 2023), las fechas de siembra tempranas podrían generar un mayor rendimiento en comparación a fechas de siembra tardías, lo que es explicado por el cambio de radiación solar incidente durante el PC. Asimismo, Paparcone y Silveira (2022) mencionan que el cultivo de soja logra interceptar alrededor de 3300 y 2764 MJ.m² en el total del ciclo, para las siembras de octubre y diciembre respectivamente, lo que se alinea con los resultados obtenidos en este experimento, donde se captaron alrededor de 2800 MJ.m² durante el ciclo del cultivo. Finalmente, Sobko et al. (2020) mencionan que el rendimiento en grano, tiene una correlación positiva con la radiación solar interceptada, si esta es elevada durante la floración se incrementa el rendimiento en grano, por lo que la radiación solar incidente podría ser uno de los factores que explique los rendimientos logrados en este trabajo.

El escarificado redujo la resistencia a la penetración (Figuras 9 y 10), lo que podría favorecer una mayor exploración radicular y, en consecuencia, una mejor absorción de agua y nutrientes. Esto coincide con lo encontrado por Sadras et al. (2005), quienes además reportaron que aunque la compactación del suelo puede reprimir el sistema radicular, el crecimiento del cultivo podría no verse perjudicado si se cuenta con un suministro de agua y nutrientes no limitante. Esto podría en parte explicar por qué el laboreo profundo no tuvo efectos directos en el rendimiento de soja tal como lo explican Girardello et al. (2014) y Lefever et al. (2024).

Por otro lado, la ausencia de diferencias significativas en el rendimiento del cultivo de soja entre una rotación de agricultura continua (arroz-soja) y con inclusión de pasturas podría estar asociada al manejo del sistema, particularmente a prácticas como la siembra directa, la inclusión de cultivos de cobertura y el aporte de materia orgánica del rastrojo de arroz. Estas prácticas contribuyen a mejorar el contenido de materia orgánica del suelo, mitigando posibles efectos negativos sobre sus propiedades físicas y favoreciendo el mantenimiento de la CFS.

En relación a la compactación del suelo, se encontraron diferencias en RP entre tratamientos, no así entre las rotaciones estudiadas. La reducción en la RP cuando se escarificó fue evidente y se mantuvo a lo largo del ciclo del cultivo, siendo su efecto más evidente en profundidad con el paso del tiempo (Figura 10). Además, los efectos del laboreo vertical fueron más marcados en la rotación arroz-soja, aunque su duración fue más limitada en comparación con la rotación que incluyó pasturas, donde los beneficios tendieron a ser más estables y prolongados (Figuras 11 y 12). Esto sugiere que la ausencia de pasturas en la rotación acelera la degradación de las propiedades físicas del suelo, lo que podría hacer que las mejoras obtenidas mediante el laboreo sean menos duraderas (Rubio, 2018).

Por otro lado, los valores de RP obtenidos para todas las profundidades en los momentos de medición, se encontraron por debajo del valor crítico de 2 MPa establecido por Benghough et al. (2011), a partir del cual se restringe la elongación radicular. Este factor también podría contribuir a explicar que no se encontraron efectos directos del laboreo sobre el rendimiento del cultivo, lo que está alineado con lo reportado por Girardello et al. (2014) quienes sostienen que, en suelos manejados bajo siembra directa con una RP baja a moderada, la escarificación no incrementa la productividad de la soja. No obstante, se encontró una relación negativa de 0,3 (R^2) entre rendimiento y RP, por lo que a medida que aumenta la RP disminuye el rendimiento (ver Figura 22). Finalmente, en una evaluación realizada por Sadras et al. (2005), la respuesta del rendimiento al laboreo fue mínima en períodos extremadamente secos o extremadamente húmedos y presenta mayor impacto en condiciones de estrés hídrico moderado ya que aumenta el acceso de agua disponible en el suelo y como consecuencia la proporción de agua evapotranspirada.

Otro componente determinante de la CFS es la infiltración. Este indicador cobra particular relevancia en sistemas agrícolas que alternan cultivos de arroz y soja dado que el arroz requiere un periodo de inundación que se ve favorecido por los suelos de drenaje

pobre, y por el contrario el cultivo de soja no tolera excesos hídricos por lo que estas características lo podrían perjudicar. Se observó que los tratamientos con escarificado presentaron una infiltración considerablemente mayor (Figura 13). Además, el efecto se mantuvo en el tiempo, ya que a los 220 días pos laboreo, se continuó encontrando una mayor infiltración respecto al control (Figura 14). Estos resultados podrían indicar que la implementación de laboreo previo al cultivo de soja podría ser beneficiosa para disminuir la probabilidad de excesos hídricos, lo cual podría perjudicar la población, el vigor de las plantas, el peso y número de nódulos, la fijación de nitrógeno, la fotosíntesis y eventualmente el rendimiento (Ploschuk et al., 2022). En síntesis, el escarificado favorece la infiltración lo que podría mejorar la captación de agua y reducir el estrés por anegamiento, dado que disminuye el riesgo de encharcamiento, y en consecuencia, incrementar indirectamente la productividad del cultivo de soja, como lo mencionan Sadras et al. (2005).

También, fue posible observar que la profundidad de la huella de la cosechadora fue mayor en los tratamientos donde se escarifica (Figura 16), lo que coincide con lo reportado por Acquah y Chen (2022). Además, estos autores encontraron que las propiedades del suelo varían no sólo con diferentes sistemas de labranza sino también con el posterior tráfico en el campo por lo que si se realiza laboreo esto debe ser considerado.

Por otro lado, el porcentaje de residuos de rastrojo en la superficie del suelo es menor cuando se escarifica (Figura 8) lo que coincide con lo encontrado por Lefever et al. (2024) quienes mencionan que el laboreo vertical redujo en promedio 16% los residuos en cobertura en relación a la labranza cero. Por otro lado, los autores mencionan al laboreo vertical como una herramienta para incorporar los residuos al suelo, acelerar su descomposición y preparar una adecuada cama de siembra. Finalmente, los mismos destacan que si bien el laboreo vertical redujo la superficie cubierta por residuos y la incidencia de malezas anuales, no influenció en la población del cultivo de soja ni el rendimiento de grano en comparación con prácticas sin labranza.

Es posible decir que en base a los resultados obtenidos sobre el rendimiento del cultivo de soja, se evidencia la interacción entre clima, suelo y manejo agronómico. En un escenario donde las altas precipitaciones cubrieron las demandas hídricas, el efecto del riego se vio disminuido, así como la interceptación de radiación solar, que ya se encontraba limitada por la fecha de siembra tardía. A nivel del suelo, el escarificado mejoró la infiltración de agua y redujo la resistencia a la penetración, lo que podría

favorecer la exploración radicular, la disponibilidad hídrica y disminuir el riesgo de encharcamiento. Sin embargo, su impacto en el rendimiento no fue significativo en un sistema con buenas prácticas de manejo tales como la siembra directa, cultivos de cobertura y rotaciones con pasturas.

Finalmente, resulta pertinente reflexionar sobre las condiciones específicas en las que el escarificado y/o el riego podrían generar diferencias en el cultivo de soja en sistemas arroceros. En el caso del escarificado, su efecto debería ser más evidente en condiciones de resistencia a la penetración considerablemente mayor a la registrada en este estudio, en la medida en que esta condición limite la expansión radicular y/o en condiciones de estrés hídrico moderado (Sadras et al., 2005). Asimismo, en situaciones donde se den precipitaciones intensas concentradas en cortos períodos, el escarificado podría resultar beneficioso al facilitar la infiltración y reducir así el impacto negativo del anegamiento. Por otra parte, el riego mostraría una respuesta diferencial en situaciones donde la oferta hídrica sea insuficiente para satisfacer las demandas del cultivo durante el periodo crítico, especialmente en sistemas de siembra temprana, donde dicho periodo coincida con los meses de mayor demanda atmosférica, a diferencia de lo sucedido en este estudio. Los sistemas evaluados resaltan la relevancia de adoptar prácticas de manejo que promuevan la productividad y calidad de los sistemas a largo plazo, como la inclusión de pastura, complementadas con el uso esporádico de herramientas como el laboreo vertical que favorezcan las propiedades físicas del suelo y le otorguen una ventaja a los sistemas frente a condiciones ambientales específicas.

6. CONCLUSIONES

No fue posible evidenciar diferencias en el rendimiento del cultivo de soja cuando se compararon una rotación que incluye pasturas contra una rotación de agricultura continua, principalmente aquellas manejadas bajo buenas prácticas agrícolas, aun empleando herramientas de descompactación y riego.

La utilización de una herramienta de descompactación como el escarificador mejoró las propiedades físicas del suelo, reduciendo la resistencia a la penetración y mejorando la infiltración de agua en el mismo. Estos efectos no se tradujeron directamente en el rendimiento del cultivo de soja posiblemente debido a la incidencia de otros otros factores, como la radiación solar o excesos hídricos, limitando el mismo. No obstante, se encontró una correlación negativa de 0,3 entre rendimiento y RP aun en condiciones de compactación baja a moderada, aunque no se tradujo directamente en el rendimiento del cultivo de soja.

Del mismo modo, el posible efecto positivo del riego en el rendimiento del cultivo de soja, no fue evidenciado en este trabajo debido a las elevadas precipitaciones durante el ciclo del cultivo, principalmente durante el PC.

Finalmente, es esperable que los resultados obtenidos puedan variar entre años especialmente en uno con una fecha de siembra tardía donde la radiación solar interceptada fue una de las principales limitantes de rendimiento, por lo que se considera importante continuar con este estudio bajo diferentes condiciones ambientales para poder realizar un mejor análisis y comprensión de las variables estudiadas y su efecto en el rendimiento de soja y propiedades físicas del suelo.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Acquah, K., & Chen, Y. (2022). Soil compaction from wheel traffic under three tillage systems. *Agriculture*, 12(2), Artículo e219.
<https://doi.org/10.3390/agriculture12020219>
- Alakukku, L., Weisskopf, P., Chamen, W., Tijink, F., Van Der Linden, J., Pires, S., Sommer, C., & Spoor, G. (2003). Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: A review: Part 1. Machine/soil interactions. *Soil and Tillage Research*, 73(1-2), 145-160.
- Altamirano, A., Da Silva, H., Duran, A., Echevarría, A., Panario, D., & Puentes, R. (1976). *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay: Vol I: Clasificación de suelos*. MAP.
- Alvarez, R., & Steinbach, H. S. (2009). A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. *Soil Tillage Research*, 104(1), 1-15.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016719870900052X>
- Asociación Uruguaya para la Protección de Obtentores Vegetales. (2022). *Teledetección y caracterización del cultivo de soja en Uruguay*.
<https://www.urupov.org.uy/wp-content/uploads/2022/05/Informe-Soja-Uruguay-2022.pdf>
- Batey, T. (2009). Soil compaction and soil management: A review. *Soil Use and Management*, 25(4), 335-345. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00236.x>
- Benghough, A. G., McKenzie, B. M., Hallett, P. D., & Valentine, T. A. (2011). Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of Experimental Botany*, 62(1), 59-68.

- Carracelas, G., Guilpart, N., & Grassini, P. (2021). Análisis de evolución de rendimiento actual y potencial en el cultivo de arroz en Uruguay. En J. Terra, S. Martinez, H. Saravia, & B. Mesones (Eds.), *Arroz 2021* (pp. 6-8). INIA. <https://www.inia.uy/sites/default/files/publications/2024-10/st-262-2021.pdf>
- Carter, R. (2002). Soil quality for sustainable land management: Organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agronomy Journal*, 94(1), 38-47. <https://doi.org/10.2134/agronj2002.3800>
- Castillo, J., Bonilla, F., Lucas, T., Amaral, R., & Terra, J. (2013). La integración del cultivo de soja a la rotación arroz-pastura en el este. *Arroz*, 15(73), 36-39. <https://www.aca.com.uy/wp-content/uploads/2014/08/La-integracion-del-cultivo-de-la-soja-a-la-rotacion-arroz-pasturas-en-el-este.pdf>
- Ciampitti, I., & García, F. (2009). Manejo del cultivo de soja. En F. García (Ed.), *Manual de manejo del cultivo de soja* (pp. 17-31). IPNI.
- Deambrosi, E. (2003). El sistema de producción de arroz en Uruguay y su sustentabilidad. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, Asociación Cultivadores de Arroz, Gremial de Molinos Arroceros, Fondo Latinoamericano de Arroz de Riego (Eds.), *3ra Conferencia Internacional de Arroz de Clima Templado* (p. 19). www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/6074/1/3ra-conferencia-Internacional-de-Arroz-de-Clima-Templado.pdf
- Deambrosi, E., & Méndez, R. (2000). Firmes beneficios de la rotación arroz-praderas. *Arroz*, 6(23), 20-23. <https://www.inia.uy/firmes-beneficios-de-la-rotacion-arroz-praderas>
- Etchegoimberry, P., & Ernst, O. (2018). Respuesta del cultivo de soja a la descompactación subsuperficial del suelo. *Cangüé*, (41), 4-9.

- Evans, L. T., & Fischer, R. A. (1999). Yield potential: Its definition, measurement, and significance. *Crop Science*, 39(6), 1544-1551.
<https://doi.org/10.2135/cropsci1999.3961544x>
- Fehr, W., & Caviness, C. (1977). *Stages of soybean development*. Iowa State University of Science and Technology.
<https://dr.lib.iastate.edu/entities/publication/58c89bfe-844d-42b6-8b6c-2c6082595ba3>
- Formoso, F. (2007). *Manual para la siembra directa*. INIA.
<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2905/1/18429230309160559.pdf>
- Giménez, L. (2012). ¿Cuánto estamos perdiendo por no regar cultivos en Uruguay? En Grupo de Desarrollo de Riego (Coord.), *Riego en cultivos y pasturas* (pp. 35-41). INIA.
- Giménez, L., Canosa, G., Prieto, C., Grasso, J. P., Montero, A., Rameau, M., Rosa, A., & Arévalo, R. (2014). Respuesta al riego suplementario en cultivos de verano y evaluación de pérdidas de rendimiento por deficiencias hídricas. En Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología del INIA (Ed.), *Riego suplementario en cultivos y pasturas* (pp. 9-28). INIA.
<https://www.inia.uy/sites/default/files/publications/2024-06/fpta-55-2014.pdf>
- Girardello, V., Amado, T., Santi, A., Cherubin, M., Kunz, J., & Teixeira, T. (2014). Resistência à penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade da soja em Latossolo argiloso manejado sob plantio direto de longa duração. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38(4), 1234-1244.
<https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000400020>
- Hamza, M., & Anderson, W. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, 82(2), 121-145.
- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. (s.f.). *Banco de datos agroclimáticos*.
<https://www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>

- Lafluf, L., Leguisamo, N., & Muñios, F. (2023). *Efectos de la fecha de siembra sobre el rendimiento de soja en condiciones de riego y secano* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Lal, R. (1994). *Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics*. The Ohio State University.
- Lefever, A. M., Wallace, J. M., White, C. M., Duiker, S. W., Esker, P. D., & Tooker, J. (2024). Vertical tillage effects on crop production and pest management in Pennsylvania. *Agronomy Journal*, 116(2), 520-530.
<https://doi.org/10.1002/agj2.21529>
- Logsdon, S., & Karlen, D. (2004). Bulk density as a soil quality indicator during conversion to no-tillage. *Soil and Tillage Research*, 78(2), 143-149.
- Macedo, I., Pravia, M. V., Castillo, J., & Terra, J. A. (2021). Soil organic matter in physical fractions after intensification of irrigated rice-pasture rotation systems. *Soil and Tillage Research*, 213, Artículo e105160.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105160>
- Martino, D. (2001). Manejo de restricciones físicas del suelo en sistemas de siembra directa. En R. Díaz Rossello (Coord.), *Siembra directa en el Cono Sur* (pp. 225-257). PROCISUR. <https://www.procisur.org.uy/adjuntos/22468.pdf>
- McConkey, B. G., Ulrich, D. J., & Dyck, F. B. (1997). Slope position and subsoiling effects on soil water and spring wheat yield. *Canadian Journal of Soil Science*, 77(1), 83-90. <https://doi.org/10.4141/S95-067>
- McKenzie, B., Tisdall, J., & Vance, W. (2014). Soil physical quality. En J. Gliński, J. Horabik, & J. Lipiec (Eds.), *Encyclopedia of Agrophysics*. (pp. 770-777). Springer. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3585-1_153

- Molfino, J. H., & Califra, A. (2001). *Agua disponible de las tierras del Uruguay: Segunda aproximación (versión corregida)*. MGAP.
[https://descargas.mgap.gub.uy/DGRN/Comunicaciones/Agua%20disponible%20de%20las%20Tierras%20del%20Uruguay%20\(segunda%20aproximaci%C3%B3n\).pdf](https://descargas.mgap.gub.uy/DGRN/Comunicaciones/Agua%20disponible%20de%20las%20Tierras%20del%20Uruguay%20(segunda%20aproximaci%C3%B3n).pdf)
- Molina, F., & Terra, J. (2023). Indicadores tecnológicos-productivos: Zafra arrocerá 2022-2023. En J. Terra, S. Martínez, I. Macedo, & C. Villalba (Eds.), *Arroz 2023* (pp. 3-9). INIA. <https://www.inia.uy/sites/default/files/publications/2024-11/st-267-2023.pdf>
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2019). *Anuario estadístico agropecuario 2019*. MGAP
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2023). *Anuario estadístico agropecuario 2023*. MGAP.
- Paparcone, S., & Silveira, F. (2022). *Efecto de la fecha de siembra y disponibilidad hídrica sobre el rendimiento del cultivo de soja* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Patrignani, A., & Ochsner, T. E. (2015). *Canopeo* (Versión 2.0) [Software]. Oklahoma State University. <https://canopeoapp.com/#/login>
- Peralta, G., Alvarez, C. R., & Taboada, M. Á. (2021). Soil compaction alleviation by deep non-inversion tillage and crop yield responses in no-tilled soils of the Pampas region of Argentina: A meta-analysis. *Soil and Tillage Research*, 211, Artículo e105022. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105022>
- Ploschuk, R. A., Miralles, D. J., & Striker, G. G. (2022). A quantitative review of soybean responses to waterlogging: Agronomical, morpho-physiological and anatomical traits of tolerance. *Plant and Soil*, 475(1-2), 237-252.
<https://doi.org/10.1007/s11104-022-05364-x>

- Quintero, C. E. (2017). Potencial de rendimiento y factores limitantes en Argentina. En G. Zorrilla de San Martín, S. Martínez, & H. Saravia (Eds.), *Arroz 2017* (pp. 107-110). INIA.
- Restaino, E., & Quincke, A. (2018). Jornada técnica de manejo de la compactación del suelo. *Revista INIA*, (53), 74-75.
<https://inia.uy/sites/default/files/publications/2024-10/revista-INIA-53-Junio-2018.p.74-75-Restaino.pdf>
- Rizzo, G., Monzon, J. P., & Ernst, O. (2021). Cropping system-imposed yield gap: Proof of concept on soybean cropping systems in Uruguay. *Field Crops Research*, 260, Artículo e107944. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107944>
- Rubio, V. (2018). *Diagnóstico de la calidad física del suelo: Impacto en el cultivo de maíz, efecto del paraplow como medida correctiva* [Tesis de maestría]. Universidad de la República.
- Sadras, V., O'Leary, G., & Roget, D. (2005). Crop responses to compacted soil: Capture and efficiency in the use of water and radiation. *Field Crops Research*, 91(2-3), 131-148.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378429004001479>
- Sartori, G. M. S., Marchesan, E., David, R. D., Donato, G., Coelho, L. L., Aires, N. P., & Aramburu, B. B. (2015). Sistemas de preparo do solo e de semeadura no rendimento de grãos de soja em área de várzea. *Ciência Rural*, 46(3), 492-498.
<https://www.scielo.br/j/cr/a/WZfg6TrCC56LH4kBTRpn6tM/>
- Sawchik, J. (1996). Agua en el suelo. En A. Morón, D. Martino, & J. Sawchik (Eds.), *Manejo y fertilidad de suelos* (pp.107-113). INIA.
- Sawchik, J., Gaso, D., & Núñez, A. (2013). Soja: Algunos aspectos a considerar para el logro de altos rendimientos. *Revista INIA*, (34), 34-37.
<https://inia.uy/sites/default/files/publications/2024-10/revista-INIA-34-p.-34-37.pdf>

- Sobko, O., Stahl, A., Hahn, V., Zikeli, S., Claupein, W., & Gruber, S. (2020). Environmental effects on soybean (*Glycine Max* (L.) Merr) production in Central and South Germany. *Agronomy*, 10(12), Artículo e1847. <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/12/1847>
- Soracco, G., Filgueira, R. R., Sarli, G. O., Fournier, L. L., Gelati, P. R., & Hilbert, J. (2009). Persistencia del efecto del subsolado sobre el movimiento del agua en el suelo en siembra directa: Uso de dos modelos teóricos. *Ciencia del Suelo*, 27(1), 77-87. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/106000>
- Spoor, G. (2006). Alleviation of soil compaction: Requirements, equipment, and techniques. *Soil Use and Management*, 22(2), 113-122. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2006.00015.x>
- Terra, J., Castillo, J., Bonilla, F., Amaral, R., Lucas, T., & Macedo, I. (2014). Soja en sistemas arroceros. *Arroz*, 16(78), 24-27. <https://www.inia.uy/sites/default/files/publications/2024-10/RevistaArroz-2014-78-p.24-27.pdf>
- United States Department of Agriculture (2001). *Soil quality test kit guide*. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/Soil%20Quality%20Test%20Kit%20Guide.pdf>
- Van Ittersum, M., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., & Hochman, Z. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance: A review. *Field Crops Research*, 143, 4-17. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>
- Zorrilla, G., & Terra, J. (2017, 6-9 de marzo). *Sustainable intensification pathways in uruguayan rice systems* [Contribución]. International Temperate Rice Conference, Griffith, Australia. <https://www.inia.uy/sites/default/files/publications/2024-10/ITRC-Australia-2017-Pres.Zorrilla.pdf>

8. ANEXOS

Anexo A.

Rotaciones evaluadas en el experimento de largo plazo y su duración

Rotación	Duración de la rotación (años)											
	1		2		3		4		5		6	
	PV	OI	PV	OI	PV	OI	PV	OI	PV	OI	PV	OI
1- Arroz Continuo	Arroz	Ta										
2- Arroz-Cultivos	Arroz	Rg	Soja	Ta	Sorgo	Ta						
3- Arroz-PP corta	Arroz	PP	PP									
4 - Arroz-PP larga	Arroz	Rg	Arroz	PP	PP	PP	PP	PP	PP	PP		
5- Arroz-Soja-PP	Arroz	Rg	Soja	Rg	Soja	Ta	Arroz	PP	PP	PP	PP	PP
6- Arroz -Soja	Arroz	Rg	Soja	Ta								

Nota. Ta= Trebol Alejandrino, Rg = Raigrás, PP= pastura permanente