

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

POTENCIAL DE RENDIMIENTO DE SOJA EN DISTINTOS AMBIENTES
AGRÍCOLAS DEL ESTE DE URUGUAY

por

Juan Pedro ECHEGUÍA GARCÍA PINTOS
Bernardino REAL ANDIÓN

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

MONTEVIDEO
URUGUAY
2026

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



PAGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Director: -----

Ing. Agr. (Dr.) Sebastián Mazzilli Vanzini

Co-Director: -----

Ing. Agr. (Dr.) Ignacio Macedo Yapor

Tribunal: -----

Ing. Agr. (Dr.) Sebastián Mazzilli Vanzini

Ing. Agr. (Dr.) Gonzalo Rizzo

Ing. Agr. (Dr.) José Terra

Fecha: 03 de Agosto de 2026

Estudiante: -----

Juan Pedro Echeguía García Pintos

Bernardino Real Andión

AGRADECIMIENTOS

A nuestros tutores, Ing. Agr. (Dr.) Sebastián Mazzilli e Ing. Agr. (Dr.) Ignacio Macedo, por su apoyo y dedicación en la realización de este trabajo.

A la Facultad de Agronomía, por brindarnos los conocimientos y herramientas fundamentales para crecer como personas y formarnos como profesionales.

A nuestros amigos y futuros colegas, por las incontables experiencias e inolvidables momentos compartidos.

Finalmente, a nuestras familias por su apoyo incondicional y por motivarnos en cada etapa de este camino. Este logro es tanto suyo como nuestro.

TABLA DE CONTENIDO

PAGINA DE APROBACIÓN.....	3
AGRADECIMIENTOS	4
TABLA DE CONTENIDO	5
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS.....	8
RESUMEN.....	9
ABSTRACT	10
1.INTRODUCCIÓN.....	11
1.1 HIPÓTESIS.....	12
1.2 OBJETIVOS.....	12
1.2.1 Objetivo general	12
1.2.2 Objetivos específicos	12
2.REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1 HISTORIA Y ACTUALIDAD DEL CULTIVO DE SOJA EN LA REGIÓN ESTE DE URUGUAY	13
2.2 SISTEMA DE PRODUCCIÓN ARROZ-SOJA	13
2.3 SUELOS AGRÍCOLAS DE LA ZONA ESTE.....	14
2.4 ANEGAMIENTO.....	16
2.4.1 Definición de anegamiento	16
2.4.2 Impacto del anegamiento en el cultivo de soja	17
2.5 BRECHA DE RENDIMIENTO Y RENDIMIENTO POTENCIAL, POTENCIAL LIMITADO POR AGUA Y REAL.....	19
2.5.1 Brecha de rendimiento	19
2.5.2 Rendimiento potencial (Y_p)	19
2.5.3 Rendimiento potencial limitado por agua (Y_w).....	19
2.5.4 Rendimiento real (Y_r)	19
2.5.5 Estimación de brecha de rendimiento.....	20
2.5.6 Rendimiento explotable	20
2.6 MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DE RENDIMIENTOS POTENCIALES	20
2.6.1 Modelos de simulación	20
2.6.2 Campos experimentales.....	21
2.6.3 Rendimientos máximos de los agricultores.....	21
2.7 BRECHAS DE RENDIMIENTO DE SOJA EN URUGUAY	22
2.8 MODELOS DE SIMULACIÓN	24
2.8.1 Utilidad de los modelos de simulación	24
2.8.2 Efecto del anegamiento utilizando modelos de simulación	24
2.8.3 Modelo de simulación Cycles	24
3. MATERIALES Y MÉTODOS	26
3.1 MODELO DE SIMULACIÓN UTILIZADO	26

3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL SIMULADO	26
3.2.1 Base de suelos.....	26
3.2.2 Base climática	29
3.2.3 Variables estudiadas respecto a fechas de siembra, grupo de madurez, condiciones hídricas, localidades y categoría climática	29
3.2.4 Caracterización de fases ENSO y comparación con categorías climáticas observadas	30
3.3 FENOLOGÍA DEL CULTIVO	31
3.3.1 Etapas fenológicas consideradas	31
3.3.2 Herramientas utilizadas para estimación de fecha de ocurrencia de etapas fenológicas.....	31
3.3.3 Ajuste fenológico en Cycles	31
3.4 SIMULACIÓN Y PROCESAMIENTO DE RESULTADOS.....	33
3.4.1 Estructura de los datos.....	33
3.4.2 Consideraciones generales sobre los datos simulados	34
3.4.3 Análisis estadísticos	34
3.4.3.1 Análisis principal: brecha riego - secano por sitio	34
3.4.3.2 Análisis secundario 1: estabilidad productiva.....	35
3.4.3.3 Análisis secundario 2: efecto de la condición climática	36
3.4.3.4 Análisis secundario 3: efecto de la fecha de siembra.....	36
3.4.3.5 Análisis secundario 4: estabilidad del ranking entre localidades	37
3.4.4 Diagnósticos.....	38
4. RESULTADOS	39
4.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA	39
4.1.1 Precipitaciones.....	39
4.1.2 Categoría climática.....	40
4.1.3 Relación entre la fase ENSO y las categorías climáticas observadas	41
4.1.4 Temperatura y amplitud térmica	42
4.1.5 Radiación solar incidente	43
4.2 RENDIMIENTO DE SOJA EN CONDICIONES DE RIEGO Y SECANO.....	45
4.2.1 Efecto del sistema hídrico y la localidad sobre el rendimiento	45
4.2.2 Comparación del rendimiento entre localidades dentro de cada condición hídrica	47
4.2.3 Variabilidad interanual del rendimiento por localidad y condición hídrica	48
4.2.4 Rendimiento en relación a la condición climática y la condición hídrica.....	50
4.2.5 Efecto de la fecha de siembra sobre el rendimiento	51
4.2.6 Estabilidad del ranking de rendimiento entre localidades	55
5. DISCUSIÓN.....	57
5.1 Diferencias entre localidades - rol del suelo y el clima.....	57
5.2 El clima interanual como factor dominante	58
5.3 El efecto estabilizador del riego.....	59

5.4 Fecha de siembra	60
5.5 Limitaciones del estudio	62
6. CONCLUSIONES	64
7. BIBLIOGRAFÍA.....	66
8. ANEXOS.....	74

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla 1 Características de las unidades de suelo seleccionadas	15
Tabla 2 Características de los perfiles de las cinco unidades de suelo seleccionadas para realizar las simulaciones.....	27
Tabla 3 Variables y respectivos tratamientos utilizados para realizar las simulaciones en el modelo Cycles.....	29
Tabla 4 Fecha de ocurrencia de etapas fenológicas y acumulación de grados días para cada FdS	32
Tabla 5 Coeficientes genéticos de soja utilizados para correr el modelo Cycles.....	32
Tabla 6 Coeficiente de variación (%) del rendimiento simulado de soja por fecha de siembra y condición hídrica.....	49
Tabla 7 Pendientes estimadas de la relación entre fecha de siembra y rendimiento estimado de soja.....	53
Figura 1 Precipitaciones mensuales promedio (1960-2024) por localidad para la estación de crecimiento del cultivo de soja	39
Figura 2 Distribución de la precipitación Octubre - Abril utilizada para la caracterización climática de las zafras	40
Figura 3 Distribución porcentual de categorías de precipitación observadas durante DEF según la fase ENSO en ASO	41
Figura 4 Temperatura máxima, media y mínima promedio (1960-2024) por localidad para el período Octubre-Abril	42
Figura 5 Amplitud térmica promedio (1960-2024) por localidad para el período Octubre-Abril.....	43
Figura 6 Radiación solar promedio (1960-2024) por localidad para el período Octubre-Abril	44
Figura 7 Media y distribución del rendimiento estimado de soja por localidad y condición hídrica.....	46
Figura 8 Brecha de rendimiento estimada (riego – seco) del cultivo de soja por localidad	47
Figura 9 Coeficiente de variación (%) del rendimiento estimado de soja por localidad y condición hídrica.....	49
Figura 10 Rendimiento estimado por condición climática y sistema hídrico con intervalos de confianza al 95%	51
Figura 11 Rendimiento estimado en función de la fecha de siembra por localidad y condición hídrica.....	54
Figura 12 Relación entre fecha de siembra y rendimiento de soja bajo riego y seco según categoría climática	54
Figura 13 Estabilidad del ranking de rendimiento bajo seco por zafra evaluando la posición de cada localidad	55
Figura 14 Distribución interanual del rendimiento bajo seco por localidad, ordenadas por mediana descendente	56

RESUMEN

La soja es el principal cultivo agrícola de Uruguay y su expansión hacia la región este ha generado la necesidad de conocer con mayor precisión el potencial productivo de estos ambientes. En esta zona, la producción se desarrolla mayoritariamente bajo condiciones de secano y sobre suelos con limitaciones asociadas a la disponibilidad de agua, el drenaje y la variabilidad climática interanual. En este contexto, los modelos de simulación constituyen una herramienta útil para estimar rendimientos potenciales y analizar la respuesta del cultivo ante diferentes combinaciones de suelo, clima y manejo. El objetivo de este trabajo fue estimar el rendimiento potencial (Y_p) y el rendimiento potencial limitado por agua (Y_w) de soja de grupo de madurez VI medio en distintos ambientes agrícolas del este de Uruguay, integrando la variabilidad edáfica y climática mediante el uso del modelo de simulación Cycles. Se evaluaron cinco localidades representativas de la región: Melo, Rincón de Ramírez, Río Branco, Treinta y Tres y Velázquez. Para cada localidad se consideró una unidad de suelo representativa, dos condiciones hídricas (riego y secano) y seis fechas de siembra, comprendidas entre mediados de octubre y fines de diciembre. Las simulaciones abarcaron 64 zafras y los resultados fueron analizados en términos de rendimiento medio, variabilidad interanual, condición climática, fecha de siembra, diferencias entre riego y secano, y estabilidad del ranking entre localidades. El rendimiento potencial promedio regional fue de $4,53 \text{ Mg ha}^{-1}$, mientras que el rendimiento potencial limitado por agua alcanzó $3,61 \text{ Mg ha}^{-1}$. Río Branco presentó los mayores rendimientos tanto bajo riego como en secano, mientras que Melo registró los menores valores. El riego incrementó el rendimiento medio y redujo la variabilidad interanual, con una diferencia promedio entre riego y secano de $0,92 \text{ Mg ha}^{-1}$. Esta diferencia fue mayor en años secos y menor en años lluviosos, evidenciando que el aporte del riego aumenta cuando la disponibilidad hídrica se vuelve más restrictiva. La fecha de siembra tuvo una influencia marcada sobre el rendimiento. Las siembras tempranas maximizaron tanto Y_p como Y_w , mientras que el atraso progresivo de la siembra redujo el rendimiento en ambas condiciones hídricas. Bajo secano, las fechas tardías presentaron menor variabilidad relativa, pero también menores rendimientos en el cuartil inferior de la distribución. Asimismo, el análisis del ranking bajo secano mostró una alta consistencia temporal entre localidades, con Río Branco ocupando el primer lugar en la mayoría de las zafras y Melo ubicándose frecuentemente en la última posición. Los resultados permiten concluir que las siembras tempranas constituyen la estrategia más favorable para maximizar el rendimiento de soja GM VI medio en los ambientes evaluados. Sin embargo, la magnitud de la respuesta depende de la condición hídrica, la localidad y la variabilidad climática interanual. La incorporación del riego resulta especialmente relevante en ambientes más sensibles a restricciones de agua, al incrementar el rendimiento esperado y reducir la inestabilidad productiva. Estos resultados aportan información para orientar decisiones de manejo y contribuir al diseño de sistemas agrícolas más adaptados a las condiciones de la región este de Uruguay.

Palabras clave: soja, rendimiento potencial, rendimiento limitado por agua, fecha de siembra, modelos de simulación

ABSTRACT

Soybean is the main agricultural crop in Uruguay, and its expansion into the eastern region has increased the need to better understand the productive potential of these environments. In this region, soybean production is mostly carried out under rainfed conditions and on soils with limitations related to water availability, drainage, and interannual climate variability. In this context, crop simulation models are useful tools to estimate potential yields and analyze crop responses to different combinations of soil, climate, and management. The objective of this study was to estimate the potential yield (Y_p) and water-limited potential yield (Y_w) of medium maturity group VI soybean in different agricultural environments of eastern Uruguay, integrating edaphic and climatic variability through the use of the Cycles simulation model. Five representative locations were evaluated: Melo, Rincón de Ramírez, Río Branco, Treinta y Tres, and Velázquez. For each location, a representative soil unit, two water conditions -irrigated and rainfed- and six sowing dates, ranging from mid-October to late December, were considered. Simulations covered 64 growing seasons, and the results were analyzed in terms of mean yield, interannual variability, climate condition, sowing date, differences between irrigated and rainfed conditions, and ranking stability among locations. The regional average potential yield was 4.53 Mg ha^{-1} , while the water-limited potential yield reached 3.61 Mg ha^{-1} . Río Branco showed the highest yields under both irrigated and rainfed conditions, whereas Melo recorded the lowest values. Irrigation increased mean yield and reduced interannual variability, with an average difference of 0.92 Mg ha^{-1} between irrigated and rainfed conditions. This difference was larger in dry years and smaller in wet years, indicating that the contribution of irrigation increases as water availability becomes more restrictive. Sowing date had a marked influence on yield. Early sowing dates maximized both Y_p and Y_w , while progressive delays in sowing reduced yield under both water conditions. Under rainfed conditions, late sowing dates showed lower relative variability, but also lower yields in the lower quartile of the distribution. In addition, the rainfed yield ranking analysis showed high temporal consistency among locations, with Río Branco occupying the first position in most growing seasons and Melo frequently ranking last. The results indicate that early sowing dates represent the most favorable strategy to maximize the yield of medium maturity group VI soybean in the evaluated environments. However, the magnitude of the response depends on water condition, location, and interannual climate variability. The use of irrigation is especially relevant in environments that are more sensitive to water restrictions, as it increases expected yield and reduces production instability. These results provide useful information to support management decisions and contribute to the design of agricultural systems better adapted to the conditions of eastern Uruguay.

Keywords: soybean, potential yield, water-limited yield, sowing date, crop simulation models

1. INTRODUCCIÓN

El sector agrícola en Uruguay está caracterizado por la producción de cultivos de verano y cultivos de invierno. Históricamente predominaban cultivos de invierno, sin embargo, a principios del siglo XXI y con tendencias crecientes a lo largo de los años, el área destinada a la siembra de cultivos de verano aumentó considerablemente. Esto se puede ver reflejado en la relación cultivos de invierno/cultivos de verano, la cual comenzó a ser favorable para los cultivos de verano a partir de la zafra 2012/2013 (Oficina de Estadísticas Agropecuarias [DIEA], 2024). Cabe mencionar que para la elaboración de este indicador únicamente se tienen en cuenta los cultivos de secano, por lo que no se incluye el cultivo de arroz. Dentro de estos, debido al área que se destina a la siembra año a año y la importancia económica que genera para el país, la soja (*Glycine max*) es el cultivo predominante.

Este cultivo se produce en distintos ambientes en Uruguay, donde se destaca la zona litoral oeste, la cual representa el 62% del área sembrada (Asociación Civil Uruguay para la Protección de los Obtentores Vegetales [URUPOV], 2023). Los motivos que explican esta localización son la cercanía a puertos para su comercialización y las características de los suelos para el óptimo crecimiento y desarrollo del cultivo. Sin embargo, cabe destacar el crecimiento que ha tenido la zona este del país, pasando de representar el 9% en la zafra 2020/2021 al 13% en la zafra 2022/2023 totalizando 156.565 hectáreas (URUPOV, 2021, 2023).

La producción de soja se lleva a cabo en un 98,8% bajo condiciones de secano (Arenare et al., 2018), cifra que puede haber variado dado el crecimiento de los sistemas bajo riego en los últimos años (Regadores Unidos del Uruguay, 2025) por lo que la fecha de siembra se concentra en el mes de noviembre. Esto coloca el periodo crítico de definición de rendimiento (PC) en momentos de menor demanda atmosférica y por lo tanto menor probabilidad de ocurrencia de deficiencias hídricas. En cuanto a los grupos de madurez (GM) utilizados, el 93% del área sembrada de soja se realizó con variedades entre 5.5 y 6.5 en la zafra 2024/2025 (URUPOV, 2025). Otros sistemas, que incluyen riego, tienden a sembrar GM más cortos de alto potencial (GM IV) (Regadores Unidos del Uruguay, 2025).

El rendimiento del cultivo de soja está limitado por variables agrometeorológicas como las precipitaciones, radiación solar y temperatura. A su vez, el suelo donde se desarrolla el cultivo tiene efecto en el rendimiento final. Si bien el rendimiento se ve afectado por distintos factores, existe la posibilidad de simularlo mediante el uso de modelos de simulación basados en procesos. La utilidad de estos es valorar factores edáficos, climáticos y agronómicos en el desarrollo, crecimiento y concreción del

rendimiento de distintos cultivos. La estimación de estos rendimientos potenciales constituye el punto de partida para analizar las brechas de rendimiento existentes en la región, lo que permite identificar los principales factores limitantes de la producción e informar decisiones de manejo.

En el presente trabajo se utilizó el modelo de simulación Cycles (Kemanian et al., s.f.) con el objetivo de estimar el potencial de rendimiento en grano de soja en distintos ambientes del este de Uruguay.

1.1 HIPÓTESIS

El rendimiento potencial y el rendimiento potencial limitado por agua del cultivo de soja varían entre ambientes y fechas de siembra como resultado de la interacción entre las condiciones edáficas, la disponibilidad hídrica y la variabilidad climática interanual. En este contexto, las siembras tempranas permiten alcanzar mayores rendimientos potenciales, aunque bajo condiciones de secano presentan una mayor variabilidad interanual. Por el contrario, el retraso de la fecha de siembra reduce el rendimiento potencial, y tiende a aumentar la estabilidad del rendimiento potencial limitado por agua.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Estimar el rendimiento potencial y el rendimiento potencial limitado por agua del cultivo de soja (GM VI) en distintos ambientes de la región este de Uruguay, integrando la variabilidad edáfica y climática mediante el uso del modelo de simulación Cycles.

1.2.2 Objetivos específicos

- a. Cuantificar el rendimiento potencial y el rendimiento potencial limitado por agua del cultivo de soja en distintas localidades del este del país, considerando fechas de siembra contrastantes.
- b. Analizar el efecto de la variabilidad climática interanual (años lluviosos, normales y secos) sobre la respuesta del cultivo a la fecha de siembra.
- c. Evaluar las diferencias entre el rendimiento potencial y el rendimiento potencial limitado por agua en términos de rendimiento medio, estabilidad productiva y brecha de rendimiento.
- d. Identificar las fechas de siembra que maximicen el rendimiento y/o su estabilidad en el tiempo.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTORIA Y ACTUALIDAD DEL CULTIVO DE SOJA EN LA REGIÓN ESTE DE URUGUAY

La zona considerada está conformada por los departamentos de Cerro Largo, Lavalleja, Maldonado, Rocha y Treinta y Tres. La producción de soja en esta región data de la década de 1960, tomando mayor importancia a partir de la década de 1970 gracias a su aporte a la producción total del país (Deambrosi, 1984). Al comienzo, la inclusión de este cultivo en dicha zona se dirigía a promover una alternativa para la rotación con arroz (principal cultivo producido). Sin embargo, según Deambrosi (1984) dada las condiciones edáficas, el cultivo pasó a ocupar las zonas de lomadas y colinas donde no se realizaba arroz y los suelos predominantes eran Argisoles y Brunosoles. A partir de la década de 1980 hasta fines de la década de 1990, el área destinada a la siembra del cultivo de soja disminuyó drásticamente en todo el país (Ferrari, 2003). Esto fue causado por la pérdida de competitividad de los granos en el mercado internacional y la falta de políticas públicas que apoyaran la expansión del sector (Arbeletche et al., 2010).

Este escenario cambió radicalmente con el inicio del siglo XXI, cuando se produjo un marcado crecimiento de la agricultura en Uruguay, liderado por el cultivo de soja. Según Arbeletche (2020) esta expansión agrícola se explica por un paquete tecnológico asociado (siembra directa y cultivares transgénicos), un contexto económico mundial favorable en relación a la demanda de commodities y la entrada de capitales externos que favorecieron el desarrollo del sector en el país. En la actualidad, la soja es el cultivo más sembrado en Uruguay alcanzando 1.343.915 hectáreas en la zafra 2023/2024 (URUPOV, 2024). Con relación a la zona bajo estudio, el cultivo se ha instalado como una opción tanto en las rotaciones arroceras como en sistemas que rotan con pasturas u otros cultivos. En la zafra 2023/2024, el este del país concentró el 12% del área sembrada con un total de 155.675 hectáreas (URUPOV, 2024).

2.2 SISTEMA DE PRODUCCIÓN ARROZ-SOJA

En las últimas décadas la producción de soja se ha expandido a zonas no tradicionales gracias a un paquete tecnológico asociado, donde se destacan tecnologías como la siembra directa y los materiales transgénicos. A su vez, este crecimiento se ha visto potenciado por el interés en la intensificación del uso del suelo (Terra et al., 2009). Esto ha generado que la soja se instale en los sistemas arroz-pasturas en la zona este como una alternativa en la rotación, con el objetivo de diversificar rubros y diluir los altos costos de producción del cultivo de arroz (Terra et

al., 2014). Según Macedo et al. (2016), la soja como antecesor del cultivo de arroz permite alcanzar mayores rendimientos de arroz (10.470 kg/ha), y disminuye la variabilidad en comparación a otros antecesores como pasturas o arroz. A su vez, requiere de menor infraestructura, por lo que logra capitalizar la maquinaria existente y el conocimiento de los productores, factores que también han impulsado su adopción.

Por otro lado, en los suelos de lomadas en la zona este, el cultivo de soja integra rotaciones agrícolas que excluyen la producción del cultivo de arroz y rotan con otros cultivos tanto de invierno como de verano, así como también con pasturas. En las rotaciones agrícolas-ganaderas de predios comerciales, si bien existen variaciones, en general la soja es el cultivo de cabecera y se realiza durante dos veranos consecutivos (INIA Uruguay, 2023). Luego del primer cultivo de soja se implanta raigrás para pastoreo, con el fin de incrementar la producción de carne en estos sistemas. Al finalizar el segundo cultivo de soja se implantan pasturas perennes en base a festuca junto con otros componentes, con el objetivo de lograr una persistencia de cinco años. Sin embargo, esta persistencia objetivo no se logra, lo que genera impactos negativos en los cultivos siguientes, relacionados a la mayor presencia de malezas, bajos porcentajes de implantación del cultivo de cabecera (soja) y aumento de costos (INIA Uruguay, 2023). En base a estas limitantes identificadas, INIA Uruguay (2023) propone intensificar los sistemas mediante una menor duración de la pastura perenne y un adecuado manejo en cuanto a la fertilización del verdeo de raigrás. Del mismo modo, como otra alternativa, se propone comenzar con una gramínea (avena) como cabecera de rotación, incluir diversos cultivos de invierno luego del primer cultivo de soja, producir maíz en el segundo verano y disminuir la duración de la pastura a tres años. Ambas propuestas presentadas apuntan a intensificar el uso de suelo y optimizar manejos para reducir costos, diversificar riesgos, aumentar el aporte de materia seca (y en consecuencia de carbono) y generar mayores ingresos en relación con el margen bruto de los sistemas tradicionales.

2.3 SUELOS AGRÍCOLAS DE LA ZONA ESTE

Esta región se caracteriza por presentar un paisaje de lomadas suaves y ondulaciones marcadas, que se combinan con extensas planicies y colinas. Estas diversas formas topográficas dan lugar a una amplia variedad de suelos, los cuales tienen particularidades que condicionan su uso y manejo. Con la finalidad de abarcar las variaciones edafológicas presentes, se identifican cinco unidades de suelos, las cuales son destinadas a la producción de cultivos y son las seleccionadas para llevar a cabo este trabajo. Estas son la Unidad de Suelo "Alférez", "La Charqueada",

“Lechiguana”, “Río Branco” y “Vergara”. A continuación, se describen las características principales de cada unidad.

Tabla 1

Características de las unidades de suelo seleccionadas

Unidad de suelo	Textura	Suelo Dominante	Relieve	Agua Disponible Potencialmente Neta (mm)	Características generales
Alférez	Franco arcilloso	Brunosol Subeútrico Lúvico	Lomadas suaves y colinas bajas	124,7	Drenaje natural imperfecto y fertilidad media a alta
La Charqueada	Franco arcillo limoso	Planosol Subeútrico Melánico	Planicies bajas	95,2	Presentan anegamiento temporal o permanente, mal drenaje natural y problemas de salinidad
Lechiguana	Franco arcilloso a arcillo-limoso	Brunosol Eútrico Típico	Áreas intermedias entre lomadas y planicies	113,3	Buen drenaje natural y fertilidad media
Río Branco	Franco a franco-arenosa	Planosol Dístrico Ócrico	Zona de transición entre lomadas y planicies	102,0	Presenta problemas de anegamiento (planicies) y zonas con buen drenaje (lomadas)
Vergara	Franco a franco-arcilloso	Argisol Subeútrico Melánico Abrúptico	Lomadas intercaladas con planicies bajas	117,1	Drenaje dependiente de posición topográfica y fertilidad variable

Nota. Elaborado con base en *Agua disponible de las tierras del Uruguay* (Molfino & Califra, 2001), *Suelos del Uruguay* (Durán & García Préchac, 2007), Museo Virtual de Suelos (Facultad de Agronomía [FAGRO], s.f.) y Carta de reconocimiento de suelos (Altamirano et al., 1976).

El valor de Agua Disponible Potencialmente Neta (mm) se obtiene a partir de corregir la estimación del valor de Agua Disponible Neta (mm) por Factores de Restricción que pretenden corregir el potencial de acumulación de agua en forma

disponible de aquellas unidades de suelo que los presenten (Molfino & Califra, 2001). Algunos de estos factores son la erosión, rocosidad y pedregosidad.

Los suelos de la región este presentan menor capacidad de almacenamiento de agua, mayor diferenciación textural con altos contenidos de limo y arcilla y menores contenidos de materia orgánica en comparación a otras zonas agrícolas, como por ejemplo el litoral oeste (Terra et al., 2009). Macedo y Terra (2014) definen a los suelos en esta región con el concepto de “doble riesgo”, explicado por poseer riesgo de sequía dada su baja capacidad de almacenamiento de agua y riesgo de anegamiento debido a sus limitantes en cuanto a drenaje interno y superficial.

2.4 ANEGAMIENTO

2.4.1 Definición de anegamiento

Dadas las características de los suelos, se ha identificado al anegamiento como una limitante en la zona este para la producción de soja. El anegamiento ocurre cuando el suelo permanece saturado por períodos prolongados con niveles de agua de al menos 20% superior a la capacidad de campo (Bailey-Serres & Voesenek, 2008; Zahra et al., 2021). Esto genera una disminución en los niveles de oxígeno en el suelo lo cual asociado a topografías planas, mal drenaje natural y precipitaciones excesivas puede limitar el crecimiento y desarrollo de los cultivos (Collaku & Harrison, 2002). Como consecuencia de este exceso hídrico, la disponibilidad de oxígeno en el suelo disminuye significativamente, lo que puede generar un rango de condiciones que va desde hipoxia (deficiencia parcial) hasta anoxia (ausencia total) (Zahra et al., 2021).

Estas condiciones de baja concentración de oxígeno alteran diversos procesos fisiológicos en las plantas. Dentro de estos, la respiración aeróbica se sustituye por un metabolismo anaeróbico como mecanismo de adaptación, en el cual se reduce la energía producida (ATP) (Bailey-Serres & Voesenek, 2008; Greenway & Setter, 1996). Esta reducción en la generación de energía tiene una estrecha relación con la absorción de nutrientes, ya que limita el suministro de energía destinada al crecimiento radicular y a la captación activa de iones, a lo que se le suma un aumento en la permeabilidad de las membranas celulares radicales, que compromete aún más la eficiencia en el transporte de nutrientes (Drew, 1983). Asimismo, el proceso fotosintético se ve comprometido debido a una menor apertura estomática, lo cual reduce el intercambio gaseoso fundamental para su funcionamiento, disminuyendo así la tasa fotosintética (Ashraf & Arfan, 2005).

2.4.2 Impacto del anegamiento en el cultivo de soja

En etapas vegetativas el anegamiento afecta principalmente al crecimiento de la raíz principal debido a que reduce el área, la longitud y el peso seco de esta (Henshaw et al., 2007a; Pires et al., 2002; Sallam & Scott, 1987). La reducción en estos componentes se debe a la disminución de la extensión de la raíz y a la muerte e inhibición en la formación de pelos radiculares (Sallam & Scott, 1987). Del mismo modo estos autores encontraron que, con relación al peso seco de las raíces, tanto para la etapa vegetativa V1 como para la etapa V4, las plantas bajo siete días de anegamiento redujeron dicho parámetro. Esto se relaciona con lo hallado por Henshaw et al. (2007a) quienes argumentan que el peso seco de la raíz principal fue significativamente menor en tratamientos bajo anegamiento. Según Smucker (1984) esto se debe a la reducción en la partición de asimilados hacia la raíz en plantas bajo condiciones de exceso hídrico.

Existen diversos estudios que reportan el desarrollo de raíces adventicias en plantas bajo anegamiento, mientras que resaltan su ausencia en condiciones sin exceso hídrico (Bacanamwo & Purcell, 1999b; Henshaw et al., 2007a). La formación de estas se presenta como un mecanismo morfológico de adaptación del cultivo de soja a condiciones de exceso hídrico y déficit de oxígeno (Bacanamwo & Purcell, 1999b; Pires et al., 2002). Además, un estudio llevado a cabo por Bacanamwo y Purcell (1999b) indica que en la corteza radicular de las raíces adventicias ocurrió la mayor formación de aerénquima. Este tejido especializado que presenta grandes espacios intercelulares llenos de aire tiene la capacidad de transferir oxígeno hacia las raíces, representando otro mecanismo de adaptación frente a estas condiciones (Pires et al., 2002; Shimamura et al., 2003; Thomas et al., 2005).

Las condiciones de exceso hídrico y la consecuente deficiencia de oxígeno afectan de forma directa la fijación biológica de nitrógeno (FBN), un proceso fundamental en las leguminosas por su asociación simbiótica con bacterias del género *Rhizobium*. Diversos estudios han demostrado que el anegamiento reduce la nodulación y el desarrollo de nódulos. Henshaw et al. (2007a) observaron que, en plantas no inundadas, el peso seco de nódulos fue tres veces mayor que en aquellas bajo anegamiento, y que a los 35 días luego de la siembra, la partición de materia seca hacia los nódulos fue significativamente superior. Del mismo modo, Sallam y Scott (1987) encontraron que, cuando el exceso de agua ocurre en V1, la nodulación se ve completamente inhibida dada las condiciones aeróbicas que demandan los rizobios. En cambio, cuando el anegamiento ocurre en etapas vegetativas más avanzadas, las plantas logran reanudar la nodulación una vez retirado el exceso de agua (Henshaw et al., 2007a; Sallam & Scott, 1987). Finalmente, Bacanamwo y Purcell (1999a) hallaron

que el exceso hídrico reduce la FBN entre un 53-56%, lo cual disminuye significativamente la absorción de nitrógeno que se expresa con síntomas de amarillamiento en hojas.

Al igual que las raíces, la parte aérea de las plantas también se ve afectada por el anegamiento. En el caso de la soja, existen estudios que revelan el efecto del exceso hídrico sobre el área foliar, el peso seco de la biomasa aérea y la relación raíz/parte aérea. Henshaw et al. (2007b) observaron que, en tratamientos control (sin inundación), la asignación de materia seca a las hojas fue significativamente mayor que en los tratamientos anegados. Del mismo modo, Bacanamwo y Purcell (1999a) reportaron que, tras 7 y 21 días de anegamiento en V6, el peso seco de la parte aérea se redujo un 14% y 26% respectivamente. En cuanto al área foliar, Henshaw et al. (2007b) registraron disminuciones del 54-57% respecto al control, lo que coincide con lo reportado por Bacanamwo y Purcell (1999b) quienes argumentan que existieron disminuciones significativas del área foliar luego de 7 días de anegamiento. Respecto a la relación raíz/parte aérea, los tratamientos anegados presentaron altas relaciones respecto al control, lo que indica que, bajo condiciones de exceso hídrico, los fotoasimilados se destinan preferentemente hacia la raíz para la formación de raíces adventicias y aerénquima como mecanismos de adaptación (Bacanamwo & Purcell, 1999b).

Finalmente, el anegamiento impacta de forma negativa en el rendimiento de soja, y la severidad de este efecto depende del estadio fenológico en que se produzca la condición de exceso hídrico. Scott et al. (1989) encontraron que, las pérdidas de rendimiento son significativamente mayores si el estrés ocurre durante fases reproductivas (R2), en comparación con etapas de crecimiento vegetativo (V4). Esto coincide con lo hallado por Linkemer et al. (1998) quienes reportaron que la mayor reducción de rendimiento bajo anegamiento ocurrió en R3, disminuciones intermedias en R1 y R5, y las menores pérdidas en la fase vegetativa (V2). En la misma línea, Oosterhuis et al. (1990) observaron que el rendimiento puede disminuir entre 39-46% cuando el anegamiento ocurre en V4 y entre 41-58% cuando este se produce en R2. Sin embargo, la representación cuantitativa de estos procesos en los modelos de simulación disponibles es limitada, lo que constituye una de las principales restricciones metodológicas del presente trabajo (ver sección 3.1 y 5.5).

2.5 BRECHA DE RENDIMIENTO Y RENDIMIENTO POTENCIAL, POTENCIAL LIMITADO POR AGUA Y REAL

2.5.1 Brecha de rendimiento

El concepto de brecha de rendimiento tiene una gran relevancia tanto científica como práctica. El análisis de éstas es una herramienta de gran utilidad para la producción agrícola, principalmente para identificar limitantes que afectan a la producción actual, ya sea un factor ambiental, agronómico o tecnológico (Lobell et al., 2009). Esta información es clave para diseñar estrategias de manejo que incrementen la productividad sin comprometer la sostenibilidad del sistema (van Ittersum et al., 2013).

El objetivo de muchos científicos y políticos no es alcanzar necesariamente los rendimientos potenciales sino mejorar los rendimientos actuales a un ritmo suficiente, para mantener bajos precios en los alimentos y evitar una expansión agrícola hacia suelos no aptos (Cassman, 1999). Para el análisis de las brechas de rendimiento (Y_g) se definen distintos niveles de rendimiento: rendimiento potencial (Y_p), rendimiento potencial limitado por agua (Y_w) y rendimiento real promedio (Y_r).

2.5.2 Rendimiento potencial (Y_p)

Se entiende como rendimiento potencial (Y_p) al rendimiento de un cultivar o híbrido adaptado en determinadas condiciones, sin limitaciones de crecimiento por agua, nutrientes, plagas, enfermedades y malezas (Evans & Fischer, 1999). El término se utiliza para sistemas bajo riego, asumiendo que un cultivo bajo riego cuenta con un suministro adecuado de agua durante su ciclo de crecimiento (Lobell et al., 2009).

2.5.3 Rendimiento potencial limitado por agua (Y_w)

El rendimiento potencial limitado por agua (Y_w), representa el máximo rendimiento posible en condiciones de secano, bajo las mismas condiciones ideales de manejo, pero donde el agua es el principal factor limitante. La mayoría de los cultivos de secano sufren, al menos en algún momento de su ciclo de crecimiento, déficit hídrico causado por precipitaciones insuficientes, o estrés por falta de oxígeno causado por exceso hídrico (Lobell et al., 2009; van Ittersum & Rabbinge, 1997). Este rendimiento está determinado tanto por la cantidad y distribución de las precipitaciones durante el ciclo de cultivo como por las propiedades edáficas que afectan el balance hídrico, como la profundidad del suelo enraizable, su capacidad de retención de agua disponible y la pendiente del terreno (van Ittersum et al., 2013).

2.5.4 Rendimiento real (Y_r)

El rendimiento real (Y_r) es el rendimiento promedio obtenido por los productores

(van Ittersum et al., 2013) en una región específica donde se reflejan condiciones reales de manejo y limitaciones económicas (Lobell et al., 2009). Dicho rendimiento se expresa en relación con la superficie cosechada, en la mayoría de las situaciones dicha área es menor a la sembrada (Fischer, 2015).

2.5.5 Estimación de brecha de rendimiento

Las brechas de rendimiento se estiman como la diferencia entre el rendimiento potencial (Y_p) o rendimiento potencial limitado por agua (Y_w) con el rendimiento real promedio de los agricultores (Y_r), en una escala espacial y temporal de interés (Lobell et al., 2009; van Ittersum et al., 2013).

2.5.6 Rendimiento explotable

Otro concepto importante es el de rendimiento explotable. Un rendimiento del 80% del potencial de rendimiento puede aproximarse al nivel óptimo económico. Llegar a este punto es lo que los agricultores tienen como objetivo, para maximizar las ganancias económicas (Lobell et al., 2009; van Ittersum et al., 2013). Además, se ha observado que, en muchas regiones, los rendimientos tienden a estabilizarse cuando alcanzan un 80% del Y_p o Y_w (Cassman, 1999). Es de importancia que exista una brecha considerable entre los rendimientos promedio y potenciales para mantener el crecimiento de los rendimientos promedios de los productores (Cassman et al., 2003; Lobell et al., 2009).

2.6 MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DE RENDIMIENTOS POTENCIALES

Para alcanzar los rendimientos potenciales, como fue planteado anteriormente, es necesario un manejo perfecto de todos los factores que determinan la producción y el rendimiento de los cultivos, desde la siembra hasta la madurez. Lograr este nivel de perfección es imposible bajo condiciones de campo, incluso en pequeñas parcelas de prueba y en menor medida en campos productivos de gran escala (Lobell et al., 2009). Lobell et al. (2009) presentan tres métodos principales para estimar el potencial de rendimiento.

2.6.1 Modelos de simulación

Éstos se han utilizado para estimar el potencial de rendimiento desde un campo específico, hasta una región o país (van Bussel et al., 2015). La mayoría de estos modelos simulan el desarrollo fenológico del cultivo basados en relaciones matemáticas que capturan los procesos fisiológicos de las plantas con relación al fotoperiodo, la asimilación neta, la asignación de recursos a diferentes órganos, la transpiración y la dinámica del agua en el suelo. Solo unos pocos modelos son robustos en cuanto a

cuantificar el impacto de otros factores de estrés, como suministro deficiente de nutrientes, impacto de insectos, enfermedades y malezas (Lobell et al., 2009).

Para realizar las simulaciones se requieren un conjunto mínimo de datos como, temperatura máxima y mínima diaria del aire a una determinada altura, radiación solar, precipitaciones, humedad relativa, fecha de siembra y coeficientes del desarrollo fenológico fototérmico del cultivar (Lobell et al., 2009). Los modelos a su vez son útiles para evaluar un solo factor de manejo en diferentes situaciones, como lo puede ser la fecha de siembra en distintos ambientes. No obstante, estos asumen condiciones ideales y ausencia de factores que reducen el rendimiento. La validez de estos modelos se verifica posteriormente a partir de calibraciones y validaciones en ensayos de campo (Lobell et al., 2009). Sin embargo, Lobell (2013) plantea que existe incertidumbre en cuanto a si los experimentos de validación llegan efectivamente a expresar el máximo rendimiento posible bajo esas condiciones, lo que justifica el uso complementario de otros métodos de estimación del rendimiento potencial.

van Ittersum et al. (2013) concluyeron que los modelos de simulación permiten una estimación más confiable de Y_p , Y_w y Y_g , debido a que consideran la variación climática de una serie de años, teniendo en cuenta interacciones entre cultivos, suelos, clima, regímenes hídricos y manejos. Los modelos capturan la variación espacial y temporal siempre y cuando se maneje una base de datos específicos y confiables de la ubicación.

2.6.2 Campos experimentales

Consiste en implementar en campos experimentales, prácticas de manejo diseñadas para eliminar los factores que reducen el rendimiento, tanto de nutrientes, plagas, enfermedades y malezas. A medida que el tamaño de la parcela aumenta, lograr condiciones óptimas durante todo el ciclo de cultivo es más complejo, tanto por el manejo como por la heterogeneidad en las propiedades del suelo. Para obtener estimaciones robustas del potencial de rendimiento se requiere realizar experimentos durante una serie de años, con el fin de garantizar una estimación que represente un rango de variación climática en una determinada ubicación (Lobell et al., 2009).

2.6.3 Rendimientos máximos de los agricultores

Otra alternativa para las estimaciones de Y_p es mediante el análisis de encuestas y base de datos, considerando los percentiles superiores de rendimiento potencial alcanzados por los agricultores (Lobell et al., 2009). Los métodos empíricos basados en los percentiles superiores alcanzados por los agricultores son estáticos y espacialmente no son explícitos, es decir, no reflejan las condiciones variables dentro

de una zona agroecológica (van Ittersum et al., 2013).

2.7 BRECHAS DE RENDIMIENTO DE SOJA EN URUGUAY

El siguiente apartado se basa en los trabajos presentados por Rizzo y Ernst (2018), Rizzo Ayphassorho (2018) y Rizzo et al. (2021) donde se estiman las brechas de rendimiento para soja de primera y de segunda, incorporando el concepto de Cropping System-imposed Yield Gap (CSIYg).

En dichos estudios se señala que, hasta ese momento, gran parte de los análisis sobre brechas de rendimiento impuestas por el sistema de cultivo se habían centrado en el rendimiento total de grano o en la energía producida por la secuencia completa de cultivos. Este enfoque resulta útil para comparar alternativas de sistemas a escala global, pero no permite cuantificar de manera precisa las pérdidas o ganancias de rendimiento en grano de cada cultivo individual derivadas del diseño de la secuencia.

En el caso de la soja, cuando se establece después de un cultivo invernal, factores de manejo como la fecha de siembra y la duración del ciclo del cultivo antecesor imponen limitaciones sobre el rendimiento potencial (Y_p) y el rendimiento limitado por agua (Y_w) del cultivo subsiguiente. Como no se había informado previamente el impacto del diseño y la secuencia de cultivos sobre Y_p , Y_w y Y_g en soja de primera y de segunda, se propuso el concepto de Cropping System-imposed Yield Gap (CSIYg), como la diferencia entre el rendimiento en grano entre soja de primera y soja de segunda, para cuantificar las consecuencias productivas de las decisiones sobre qué sistema de cultivos implementar.

En este marco, uno de los objetivos planteados de estos trabajos fue cuantificar Y_w , Y_r y Y_g de la soja de primera y de la soja de segunda por separado, y estimar la brecha de rendimiento que el sistema de cultivo impone sobre la soja de segunda en relación con la de primera. El estudio se realizó para cinco zonas meteorológicas en el Uruguay (Young, Mercedes, La Estanzuela, Trinidad y Treinta y Tres). Las estimaciones se realizaron utilizando modelos de simulación calibrados (Modelo CROPGRO-Soybean integrado en DSSAT v4) y se siguió el protocolo metodológico del Global Yield Gap Atlas.

Se observó que la soja de segunda presentó rendimientos potenciales menores que la soja de primera (5.7 y 6.6 Mg ha⁻¹ respectivamente). Esta pérdida de 0.9 Mg ha⁻¹, es la brecha de rendimiento impuesta por el sistema ($CSIYgC = Y_{pS1} - Y_{pS2}$). Se explica principalmente debido a que su siembra más tardía limita la captación de radiación y las condiciones de temperatura. Algo similar ocurrió con los rendimientos reales (Y_r), que también fueron más bajos en soja de segunda de 2.0 Mg ha⁻¹ y 2.5

Mg ha⁻¹ para soja de primera. Se obtuvo una brecha impuesta por el sistema y sus prácticas de manejo de 0.5 Mg ha⁻¹ (CSIYgM = YrS1 – YrS2). Esto se puede deber principalmente a las diferencias en el manejo que reciben ambos sistemas, más allá de la fecha de siembra. La soja de segunda, en general, suele sembrarse con una menor fertilización y en suelos con baja disponibilidad de nutrientes, lo que limita su desarrollo. A esta situación se suma que la descomposición de los rastrojos inmoviliza parte del fósforo disponible, generando una mayor restricción para el cultivo.

En los rendimientos potenciales limitados por agua (Yw), se detectó una marcada variabilidad interanual pudiéndose explicar por variabilidad en las precipitaciones en Uruguay y por la limitada capacidad de retención de agua de los suelos. Si bien la soja de primera generalmente alcanza mayores rendimientos potenciales gracias a condiciones iniciales más favorables de radiación y disponibilidad de agua, esto no ocurre todos los años. En aproximadamente un 35 % de los años, la soja de segunda superó a la de primera, logrando rendimientos similares en promedio. La brecha del sistema debido a radiación y disponibilidad de agua y su dinámica (CSIYgW = YwS1 – YwS2) se estimó en 0.2 Mg ha⁻¹, menor a las brechas CSIYgC y CSIYgM.

Para la brecha de rendimiento (Yg), definida como la diferencia entre el rendimiento limitado por agua y el rendimiento real. La variación interanual constituyó la principal fuente de diferencia, explicando alrededor del 75% de la variabilidad. En la soja de primera, los factores más influyentes fueron la cantidad de agua disponible en el suelo al momento de la siembra, el déficit hídrico durante el período crítico, la disponibilidad de agua a lo largo de todo el ciclo y la radiación solar en el período crítico. Para la soja de segunda, los factores determinantes fueron el déficit hídrico durante el período crítico, el agua disponible al inicio de la formación de vainas, la radiación solar en ese período y la disponibilidad de agua durante el ciclo completo del cultivo.

Entre las zonas analizadas, Treinta y Tres presentó el menor rendimiento potencial para ambos ciclos, con 6.2 Mg ha⁻¹ en soja de primera y 5.1 Mg ha⁻¹ en soja de segunda; sin embargo, esta estación registró el Yw más alto para soja de primera, con 4.0 Mg ha⁻¹. Por su parte, la región que incluye a Mercedes mostró el mayor rendimiento potencial en soja de segunda, alcanzando un Yw de 3.7 Mg ha⁻¹. La estación de Young presentó los valores más bajos de Yw en ambos ciclos, con 3.2 Mg ha⁻¹ para soja de primera y 3.3 Mg ha⁻¹ para soja de segunda, aunque estas diferencias entre zonas no resultaron estadísticamente significativas. Cabe señalar que los valores de rendimiento potencial reportados en esos estudios se obtuvieron con el modelo CROPGRO-Soybean (DSSAT), mientras que en el presente trabajo se utiliza el modelo Cycles con

un cultivar de GM VI, lo que puede generar diferencias en los valores absolutos estimados.

2.8 MODELOS DE SIMULACIÓN

Los modelos de simulación de cultivos se basan en relaciones matemáticas que representan los distintos procesos biológicos que ocurren durante el ciclo de los cultivos, en interacción con variables edáficas, climáticas y el manejo agronómico (Hoogenboom, 2000).

2.8.1 Utilidad de los modelos de simulación

Los modelos de simulación se presentan como una herramienta útil para relacionar las múltiples variables que afectan a un cultivo, con el objetivo de predecir datos acerca de este, como por ejemplo el rendimiento (Hoogenboom, 2000; Kemanian et al., 2024). Al mismo tiempo, estos pueden ayudar en la planificación de futuros cultivos o en las decisiones de manejo durante el ciclo de un cultivo, basándose en la incidencia de variables climáticas, edafológicas y agronómicas (Hernández et al., 2009).

2.8.2 Efecto del anegamiento utilizando modelos de simulación

En la actualidad las herramientas de simulación ofrecen múltiples oportunidades para la optimización de la producción de granos, sin embargo, no logran estimar acertadamente la respuesta de las plantas al exceso hídrico (Li et al., 2019). El motivo que explica este error se basa en que la gran mayoría de los modelos disponibles no incluyen, o cuantifican erróneamente, las adaptaciones fisiológicas de las plantas al anegamiento (Shaw et al., 2013). Por ende, no logran considerar el impacto de esta condición en el rendimiento de los cultivos, la cual se podría ver favorecida en el futuro por el cambio climático, al aumentar la frecuencia de lluvias intensas y eventos extremos (Li et al., 2019).

2.8.3 Modelo de simulación Cycles

Para el presente trabajo se utilizó el modelo de simulación Cycles. Este modelo permite simular cualquier sistema de monocultivo o policultivo asociados con distintas medidas de manejo. Dentro de estos se encuentran cultivos de cobertura, intersembras, rotaciones de cultivos anuales que incluyan pasturas y emergencias de malezas que interfieran en distintos momentos del ciclo de los cultivos (Kemanian et al., 2024). En cuanto a los posibles manejos que se pueden simular, se encuentra el riego, fertilización, laboreos, entre otros. De igual forma, el modelo considera la hidrología del suelo, el ciclo del carbono y nitrógeno, y el crecimiento y rendimiento de los cultivos permitiendo obtener datos a nivel de agroecosistema (Kemanian et al., 2024).

En relación al anegamiento, tema relevante en la zona y frecuentemente omitido en los modelos disponibles, Cycles estima la porosidad de aire en los primeros 50 cm del suelo. A partir de este valor, reduce linealmente la eficiencia en el uso de la radiación cuando la porosidad desciende por debajo del 10%, llegando a cero en condiciones de anegamiento total. Sin embargo, el modelo no contempla la mortalidad del cultivo por este efecto (A. Kemanian, comunicación personal, s.f.)

En este modelo es necesario cargar las correspondientes características climáticas, edafológicas y la descripción del cultivo a utilizar, donde también se puede modificar su manejo, para realizar la simulación. Estos datos son usados por el modelo como entradas (inputs). A partir de estas se generan los resultados o también llamados salidas (outputs).

En cuanto a las salidas (outputs), el modelo ofrece una amplia variedad de resultados como el rendimiento en grano, biomasa acumulada, transpiración real y potencial y carbono orgánico del suelo. Al mismo tiempo, ofrece resultados relacionados al ciclo de nutrientes y el contenido de estos en grano y rastrojo, así como también, resultados asociados al ambiente y al suelo.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 MODELO DE SIMULACIÓN UTILIZADO

Se utilizó el modelo de simulación Cycles (versión 1.4.4) (Kemanian et al., s.f.) para estimar el rendimiento potencial y el limitado por agua del cultivo de soja en la región Este de Uruguay. El crecimiento del cultivo se estima mediante eficiencia en el uso de la radiación (RUE) y de la transpiración. El balance hídrico del suelo se resuelve por capas, incorporando infiltración, drenaje, evapotranspiración y extracción radicular. El rendimiento final se estima a partir del índice de cosecha aplicado sobre la biomasa aérea acumulada al momento de madurez fisiológica. El modelo es de libre acceso y puede descargarse desde la página oficial del Penn State College of Agricultural Sciences.

3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL SIMULADO

3.2.1 Base de suelos

La simulación se realizó sobre cinco unidades de suelos representativas de la zona este de Uruguay en las cuales se lleva a cabo la producción del cultivo de soja. Las fueron “Alférez”, “La Charqueada”, “Lechiguana”, “Río Branco” y “Vergara”. La información fue extraída de la Carta de Reconocimientos de Suelos del Uruguay (Altamirano et al., 1976). A partir de esto se cargó al modelo como “input” el espesor y número de horizontes, el contenido de arcilla, limo y arena, la densidad aparente y el carbono orgánico del suelo (SOC) (Tabla 2). La capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente de cada horizonte fueron estimados internamente por Cycles a partir de la textura y la densidad aparente mediante funciones de pedotransferencia (Saxton & Rawls, 2006).

Tabla 2

Características de los perfiles de las cinco unidades de suelo seleccionadas para realizar las simulaciones

Unidad de suelo	Profundidad (cm)	Textura (%)			SOC (%)	Densidad aparente (Mg/m ³)
		Limo	Arcilla	Arena		
Alférez	0 - 10	56,7	23,4	19,9	1,73	1.28
	10 - 20	56,7	23,4	19,9	1,73	1.28
	20 - 30	42,5	44,9	12,6	1,24	1.33
	30 - 40	42,5	44,9	12,6	1,24	1.33
	40 - 58	42,8	45,5	11,7	0,69	1.38
	58 - 68	56,6	34,6	8,8	0,18	1.42
	68 - 78	56,6	34,6	8,8	0,18	1.42
La Charqueada	0 - 15	61	25,8	13,2	2,71	1.19
	15 - 21	61,5	21,9	16,6	1,55	1.30
	21 - 27	56,9	24,2	18,9	0,93	1.36
	27 - 56	45,2	34,8	20,0	0,65	1.39
	56 - 78	35,9	48,3	15,8	0,51	1.41
	78 - 105	48,3	39,7	12,0	0,19	1.42
	105 - 120	43,7	42,3	14,0	0,08	1.44
Lechiguana	0 - 12	52,6	35,0	12,4	4,60	1.01

	12 - 25	46,2	43,8	10,0	2,60	1.20
	25 - 35	33,4	59,6	7,0	2,0	1.26
	35 - 45	33,4	59,6	7,0	2,0	1.26
	45 - 55	28,7	70,0	1,3	1,10	1.36
	55 - 65	28,7	70,0	1,3	1,10	1.36
	65 - 85	46,7	53,4	0,3	0,30	1.42
Río Branco	0 - 12	50,1	8,70	41,2	1,5	1.34
	12 - 25	50,4	9,0	40,6	0,99	1.38
	25 - 38	37,4	34,8	27,8	0,87	1.39
	38 - 63	37,8	38,7	23,5	0,29	1.42
	63 - 82	41,6	39,6	18,8	0,17	1.44
	82 - 100	44,1	37,6	18,3	0,17	1.45
	100 - 115	49,8	31,3	18,9	0,17	1.45
Vergara	0 - 26	39,2	12,2	48,6	2,26	1.28
	26 - 40	40,6	13,0	46,4	0,72	1.59
	40 - 50	24,4	36,0	39,6	1,22	1.38
	50 - 60	24,4	36,0	39,6	1,22	1.38
	60 - 80	29,8	35,8	34,4	0,53	1.43
	80 - 100	32,9	36,2	30,9	0,29	1.45
	100 - 120	33,7	30,6	35,7	0,15	1.46

3.2.2 Base climática

Los datos climáticos (temperatura máxima y mínima, radiación solar, humedad relativa máxima y mínima, viento y precipitaciones) utilizados en el modelo como “input” fueron extraídos a partir de la base de datos climática global ERA5 para un período de 64 años (1960-2024). Dada la disponibilidad de información climática para las diferentes localidades, se asoció cada base climática a una unidad de suelo, lo cual se detalla en la Tabla 3. Los datos corresponden a la resolución estándar de ERA5 ($\sim 0,25^\circ$, equivalente a ~ 25 km), sin aplicación de corrección de sesgo.

3.2.3 Variables estudiadas respecto a fechas de siembra, grupo de madurez, condiciones hídricas, localidades y categoría climática

Las simulaciones se realizaron considerando un GM6 sembrado en 6 fechas de siembra desde octubre a diciembre, sobre 5 localidades con diferencias de suelos y clima, considerando tres regímenes de precipitaciones contrastantes (seco, normal y lluvioso) y bajo condiciones de riego y secano para un período de 64 años (1960-2024) (Tabla 3).

Tabla 3

Variables y respectivos tratamientos utilizados para realizar las simulaciones en el modelo Cycles

Variables	Tratamientos evaluados
Fechas de siembra (FdS)	15/oct, 1/nov, 15/nov, 30/nov, 15/dic, 30/dic
Grupo de madurez (GM)	VI medio
Condiciones hídricas	Riego y Secano
Localidad (Unidad de Suelo)	Melo (Lechiguana), Rincón de Ramírez (Vergara), Río Branco (Río Branco), Treinta y Tres (La Charqueada), Velázquez (Alférez)
Categoría climática	Seco < p25, $p25 \leq$ Normal $\leq$ p75 y Lluvioso > p75.
Combinaciones simuladas	FdS x Condiciones hídricas x Localidad x Categoría climática

Con respecto al manejo del riego, el modelo ofrece la herramienta de riego automático, dependiendo del nivel de agua en el suelo que puede agotarse antes de

activar dicha herramienta. Para este trabajo, se optó por un nivel de agotamiento de agua de 0.3, es decir que, el riego se activó cuando el contenido de agua disponible en el suelo estuvo por debajo del 70% de la capacidad de campo.

Para caracterizar climáticamente cada zafra se calcularon los percentiles 25 y 75 de la precipitación acumulada entre octubre-abril para cada localidad en forma independiente. A partir de estos umbrales se definieron tres categorías climáticas: Seco $< p_{25}$, $p_{25} \leq \text{Normal} \leq p_{75}$ y Lluvioso $> p_{75}$. Esta caracterización permitió clasificar las zafras según la disponibilidad hídrica registrada en cada localidad y posteriormente comparar los rendimientos simulados entre categorías climáticas, fechas de siembra, localidades y condiciones hídricas.

3.2.4 Caracterización de fases ENSO y comparación con categorías climáticas observadas

Para este análisis se utilizó una clasificación climática independiente de la descrita en 3.2.3, basada exclusivamente en la precipitación acumulada durante el trimestre diciembre–enero–febrero (DEF). Esta clasificación no se utiliza en los análisis de rendimiento. Con el objetivo de evaluar la capacidad del fenómeno ENSO para explicar la variabilidad de las precipitaciones estivales, se comparó la fase ENSO correspondiente al trimestre agosto-setiembre-octubre (ASO) con la clasificación climática observada para el período diciembre-enero-febrero (DEF)

La fase ENSO se determinó a partir del Índice RONI (Relative Oceanic Niño Index), utilizando los valores ASO para cada zafra entre 1960 y 2024. Los años se clasificaron como:

- El Niño: valores de ASO mayores o iguales a 0,5 °C
- La Niña: valores de ASO menores o iguales a -0,5 °C
- Neutral: valores intermedios entre -0,5 y 0,5 °C

Las precipitaciones observadas se caracterizaron a partir de los registros mensuales de cada localidad. Para cada sitio y zafra se calculó la precipitación acumulada de diciembre, enero y febrero. Luego, para cada localidad se calcularon los percentiles 25 y 75, clasificando cada año como:

- Trimestre Seco: precipitaciones DEF inferior al percentil 25
- Trimestre Normal: precipitaciones DEF comprendida entre los percentiles 25 y 75
- Trimestre Lluvioso: precipitaciones DEF superior al percentil 75

Una vez definidas ambas clasificaciones, la fase ENSO se comparó con la categoría climática observada. Se consideró que existía “acierto” cuando:

- Un año Niño coincidía con una condición lluviosa
- Un año Niña coincidía con una condición seca
- Un año Neutral coincidía con una condición Normal

3.3 FENOLOGÍA DEL CULTIVO

3.3.1 Etapas fenológicas consideradas

Se identificaron las etapas fenológicas más relevantes en el ciclo del cultivo de soja, siendo estas emergencias (Em), inicio de floración (R1) y madurez fisiológica (R7).

3.3.2 Herramientas utilizadas para estimación de fecha de ocurrencia de etapas fenológicas

Mediante la utilización del software “Modelos CRONOS” y empleando particularmente “CronosoyaUY” (Severini et al., s.f.), se estimó en qué fechas ocurrirían las etapas fenológicas previamente mencionadas dependiendo la fecha de siembra. Esto se realizó para cada fecha de siembra evaluada utilizando un cultivar GM VI-medio (6.3) que ofrece el software. El mismo se encuentra disponible en la página web de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires.

3.3.3 Ajuste fenológico en Cycles

Se ajustó de forma manual la fenología en Cycles realizando corridas del modelo, para el GM utilizado y cada FdS mencionada previamente. Esta etapa del trabajo se realizó con el objetivo de corregir la fenología del cultivo de soja en el modelo y cuantificar los grados días (GD) requeridos para que ocurran las etapas fenológicas previamente mencionadas (Tabla 4).

Tabla 4

Fecha de ocurrencia de etapas fenológicas y acumulación de grados días para cada FdS

Grupo de Madurez	Fecha de Siembra	Estadio Fenológico (Fecha)			Estadio Fenológico (Grados Día)		
		Emergencia	R1	R7	Emergencia	R1	R7
GM VI	15/10	23/10	17/12	03/04	100	867	2608
	30/10	06/11	08/01	08/04	100	1038	2500
	15/11	21/11	22/01	12/04	100	1070	2310
	30/11	06/12	31/01	16/04	100	1018	2192
	15/12	21/12	08/02	20/04	100	921	2008
	30/12	04/01	15/02	25/04	100	801	1831

Para el resto de los coeficientes genéticos del cultivo, se utilizaron los ajustados para las condiciones locales (Pravia et al., 2024) (Tabla 5).

Tabla 5

Coeficientes genéticos de soja utilizados para correr el modelo Cycles

Parámetro	Valor	Unidad
Fenología		
Temperatura base para el desarrollo	5	°C
Temperatura óptima para el desarrollo	28	°C
Temperatura máxima para el desarrollo	43	°C
Asignación		
Partición inicial hacia la parte aérea	0.45	%
Partición final hacia la parte aérea	0.95	%
Índice de cosecha máximo posible	0.4	-
Índice de cosecha mínimo posible	0.315	-
Raíz		
Profundidad máxima de raíces	1.15	m
Crecimiento		
Eficiencia de uso de la radiación	1.3	(g/MJ radiación solar)

Eficiencia de uso de transpiración	4.5	(g/kg)
Transpiración		
Temperatura mínima para la transpiración	5	°C
Temperatura umbral para la transpiración	15	°C
kc	1	-
Umbral de potencial hídrico de la hoja para el inicio del estrés	- 1000	(J/kg)
Potencial hídrico de la hoja en el punto de marchitamiento	- 1800	(J/kg)
Tasa máxima de transpiración	8	(mm/día)
Estrés		
Temperatura mínima para calcular el factor de daño por frío	-5	°C
Temperatura umbral para calcular el factor de daño por frío	2	°C
Nutrición		
Concentración máxima de nitrógeno en el tejido	0.07	(g/g)
Curva de dilución de nitrógeno	0.4	-
Manejo		
Cobertura máxima del cultivo	100	%
Cobertura de residuos del cultivo	10	%

Nota. Elaborado a partir del modelo de simulación Cycles, versión 1.4.4 (Kemanian et al., s.f.).

3.4 SIMULACIÓN Y PROCESAMIENTO DE RESULTADOS

3.4.1 Estructura de los datos

La base de datos consiste en 3.840 observaciones de rendimiento de soja (Mg ha^{-1}) generadas mediante simulaciones con el modelo de simulación de cultivos Cycles. El diseño combina cinco sitios (Melo, Rincón de Ramírez, Río Branco, Treinta y Tres y Velázquez), dos sistemas hídricos (riego, RIE; secano, SEC), seis fechas de siembra (entre el 15 de octubre y el 30 de diciembre) y 64 zafras consecutivas (1961 - 2024), resultando en un diseño completamente balanceado. Cada sitio está asociado a un tipo de suelo, por lo que ambos factores se encuentran confundidos y se utiliza únicamente la variable sitio en los análisis. Adicionalmente, para cada zafra se dispone de la

precipitación acumulada entre octubre y abril, y su clasificación en tres categorías de condición climática: SECO, NORMAL y LLUVIOSO.

3.4.2 Consideraciones generales sobre los datos simulados

Dado que la información proviene de simulaciones determinísticas, la variabilidad observada entre zafras se atribuye exclusivamente al clima utilizado por el modelo, sin error experimental aleatorio. En consecuencia, y considerando el elevado tamaño muestral ($N = 3.840$), la interpretación de los resultados se basa primariamente en la magnitud de los efectos estimados y en sus intervalos de confianza al 95 %, y solo secundariamente en los valores p , los cuales tienden a ser muy pequeños incluso para diferencias agronómicamente menores.

3.4.3 Análisis estadísticos

Los análisis se realizaron en R (versión 4.6.0), utilizando los paquetes lme4, lmerTest, nlme, emmeans, multcompView y car. Se establecieron como análisis principal la comparación entre sistemas hídricos por sitio, y como análisis secundarios la evaluación de la estabilidad productiva, el efecto de la condición climática y el efecto de la fecha de siembra.

3.4.3.1 Análisis principal: brecha riego - seco por sitio

Para el análisis principal, los rendimientos se promediaron a nivel de cada combinación zafra $\times$ sitio $\times$ sistema, eliminando la fecha de siembra como factor en este nivel, dado que las seis fechas de siembra dentro de una misma zafra comparten el mismo forzante climático y no constituyen réplicas independientes del efecto del sistema hídrico. El efecto de la fecha de siembra se evalúa en un análisis posterior. Sobre la base resultante (640 observaciones) se ajustaron dos modelos lineales mixtos complementarios.

Modelo conjunto (Modelo A): Para evaluar el efecto del sistema hídrico y del sitio sobre el rendimiento se ajustó un modelo lineal mixto de la forma:

$$Y_{ijk} = \mu + S_i + L_j + (S \times L)_{ij} + A_k + E_{ijk}$$

Donde Y_{ijk} representa el rendimiento correspondiente al i -ésimo sistema hídrico, el j -ésimo sitio y la k -ésima zafra; μ representa la media general; S_i representa el efecto fijo del i -ésimo sistema hídrico (riego o seco); L_j representa el efecto fijo del j -ésimo sitio; $(S \times L)_{ij}$ representa la interacción entre el sistema hídrico y el sitio; A_k representa el efecto aleatorio de la k -ésima zafra, incluido para captar la variabilidad climática interanual común a todos los sitios; y E_{ijk} representa el error residual.

Los diagnósticos de los residuos evidenciaron heterogeneidad de varianzas entre sistemas, posteriormente confirmada mediante el test de Levene. En consecuencia, el modelo se reajustó utilizando el paquete *nlme*, permitiendo varianzas residuales específicas para cada sistema mediante una estructura de varianza *varIdent*. Este modelo presentó un menor AIC que el modelo homocedástico ($\Delta AIC = 233$), por lo que fue seleccionado para el análisis final.

Modelo sobre la brecha (Modelo B): Para evaluar si la magnitud de la brecha de rendimiento entre los sistemas de riego y secano difirió entre sitios, para cada combinación de sitio y zafra se calculó la brecha como la diferencia entre el rendimiento bajo riego y el rendimiento bajo secano:

$$G_{jk} = YRIE_{jk} - YSEC_{jk}$$

Posteriormente, se ajustó un modelo lineal mixto de la forma:

$$G_{jk} = \mu + L_j + A_k + E_{jk}$$

Donde G_{jk} representa la brecha de rendimiento correspondiente al j-ésimo sitio y la k-ésima zafra; μ representa la media general de la brecha; L_j representa el efecto fijo del j-ésimo sitio; A_k representa el efecto aleatorio de la k-ésima zafra, incluido para captar la variabilidad interanual común a los sitios; y E_{jk} representa el error residual.

El cálculo de la brecha como diferencia entre el rendimiento bajo riego y secano para cada combinación de sitio y zafra permitió comparar directamente la magnitud de la respuesta al riego entre sitios, controlando la variación asociada a cada zafra. Las medias marginales estimadas y sus intervalos de confianza del 95 % se obtuvieron mediante el paquete *emmeans*. Las comparaciones múltiples entre sitios se realizaron mediante el ajuste de Tukey y los grupos que no presentaron diferencias significativas ($\alpha = 0,05$) se identificaron mediante letras obtenidas con *multcompLetters*.

3.4.3.2 Análisis secundario 1: estabilidad productiva

La estabilidad del rendimiento entre zafras se evaluó mediante el coeficiente de variación ($CV = SD/media \times 100$) calculado para cada combinación de sitio $\times$ sistema. La heterogeneidad de varianzas entre sistemas dentro de cada sitio se contrastó con el test de Levene. Adicionalmente, para evaluar el efecto de la fecha de siembra sobre la estabilidad productiva, se calculó el CV del rendimiento promediando sobre las cinco localidades para cada combinación de fecha de siembra $\times$ sistema hídrico.

3.4.3.3 Análisis secundario 2: efecto de la condición climática

Para evaluar el efecto de la condición climática sobre el rendimiento se utilizó la base completa (3.840 observaciones) y se ajustó un modelo lineal mixto de la forma:

$$Y_{ijklm} = \mu + S_i + C_j + (S \times C)_{ij} + L_l + A_k + F_{m(k)} + \varepsilon_{ijklm}$$

Donde Y_{ijklm} representa el rendimiento; μ representa la media general; S_i representa el efecto fijo del i -ésimo sistema hídrico; C_j representa el efecto fijo de la j -ésima categoría de condición climática; $(S \times C)_{ij}$ representa la interacción entre el sistema hídrico y la condición climática; L_l representa el efecto fijo del l -ésimo sitio; A_k representa el efecto aleatorio de la k -ésima zafra; $F_{m(k)}$ representa el efecto aleatorio de la m -ésima fecha de siembra dentro de la k -ésima zafra; y ε_{ijklm} representa el error residual.

La interacción entre sistema hídrico y condición climática se incluyó para evaluar si el efecto de la condición climática sobre el rendimiento difirió entre los sistemas de riego y secano. La zafra se incorporó como efecto aleatorio para considerar la variabilidad climática interanual, mientras que la fecha de siembra anidada dentro de la zafra se incluyó como efecto aleatorio para representar la variación asociada a las distintas fechas de siembra dentro de cada año.

La pertinencia de la interacción entre sistema hídrico y condición climática se evaluó mediante un test de razón de verosimilitud, comparando el modelo con interacción con un modelo reducido sin dicha interacción. Ambos modelos se ajustaron mediante máxima verosimilitud. Adicionalmente, se comparó el criterio de información de Akaike (AIC), considerándose evidencia a favor del modelo con interacción cuando presentó una reducción de AIC superior a 2 unidades respecto del modelo sin interacción.

3.4.3.4 Análisis secundario 3: efecto de la fecha de siembra

Para evaluar el efecto de la fecha de siembra sobre el rendimiento simulado de soja (GM VI) se utilizó la base completa de 3.840 observaciones. La fecha de siembra se expresó como día del año (DOY), con un rango comprendido entre el DOY 288 (15 de octubre) y el DOY 364 (30 de diciembre), correspondiente a las seis fechas de siembra evaluadas.

Se ajustó un modelo lineal mixto de la forma:

$$Y_{ijklm} = \mu + D_i + L_j + C_k + S_l + (D \times C)_{ik} + (D \times S)_{il} + (C \times S)_{kl} + A_m + \varepsilon_{ijklm}$$

Donde Y_{ijklm} representa el rendimiento; μ representa la media general; D_i representa el efecto fijo de la fecha de siembra, expresada como día del año (DOY); L_j representa el efecto fijo del j-ésimo sitio; C_k representa el efecto fijo de la k-ésima categoría climática (LLUVIOSO, NORMAL o SECO); S_l representa el efecto fijo del l-ésimo sistema hídrico (riego o seco); $(D \times C)_{ik}$ representa la interacción entre fecha de siembra y categoría climática; $(D \times S)_{il}$ representa la interacción entre fecha de siembra y sistema hídrico; $(C \times S)_{kl}$ representa la interacción entre categoría climática y sistema hídrico; A_m representa el efecto aleatorio de la m-ésima zafra; y ε_{ijklm} representa el error residual. La inclusión de las interacciones permitió evaluar si la respuesta del rendimiento al atraso de la fecha de siembra dependió de la condición climática y del sistema hídrico, así como si el efecto de la condición climática difirió entre los sistemas de riego y seco. La zafra se incluyó como efecto aleatorio para considerar la variabilidad climática interanual común a los sitios y fechas de siembra evaluados dentro de un mismo año.

El modelo se ajustó mediante máxima verosimilitud restringida (REML) utilizando el paquete *lme4*. La significancia de los efectos fijos se evaluó mediante un análisis de varianza tipo III, empleando el método de Satterthwaite para la estimación de los grados de libertad mediante el paquete *lmerTest*. Las pendientes de la relación entre fecha de siembra y rendimiento se estimaron para cada combinación de sistema hídrico y categoría climática mediante la función *emtrends* del paquete *emmeans*. Las comparaciones múltiples entre categorías climáticas dentro de cada sistema hídrico se realizaron con corrección de Tukey. A partir de las pendientes estimadas se calculó la pérdida de rendimiento asociada a un atraso de 15 días en la fecha de siembra, multiplicando cada pendiente por 15. Las pendientes presentadas en la Tabla 7 corresponden a las estimaciones obtenidas mediante el modelo lineal mixto anteriormente descrito.

Como medida descriptiva complementaria, se calculó el coeficiente de determinación (R^2) mediante regresiones lineales simples entre la fecha de siembra y el rendimiento para cada combinación de sistema hídrico y categoría climática. Este análisis representa la asociación marginal entre ambas variables y no descuenta la variabilidad interanual atribuida al efecto aleatorio de la zafra.

Los rendimientos correspondientes a la fecha de siembra más temprana (DOY 288; 15 de octubre) y a la más tardía (DOY 364; 30 de diciembre) se obtuvieron como

el promedio del rendimiento para cada combinación de localidad, sistema hídrico y fecha de siembra considerando todas las zafras disponibles.

Finalmente, con fines gráficos y descriptivos, las curvas de rendimiento en función de la fecha de siembra se obtuvieron mediante regresiones cuadráticas ajustadas por separado para cada sistema hídrico, incluyendo términos lineal y cuadrático del DOY. Estas curvas se generaron mediante la función *geom_smooth* del paquete *ggplot2* y no corresponden al modelo lineal mixto utilizado para la inferencia estadística.

3.4.3.5 Análisis secundario 4: estabilidad del ranking entre localidades

Con el objetivo de evaluar la consistencia temporal del desempeño de las localidades bajo condiciones de secano, se realizó un análisis de ranking de rendimiento entre sitios. Para cada zafra evaluada, las localidades fueron ordenadas de acuerdo con el rendimiento simulado bajo secano, asignando la posición 1 a la localidad con mayor rendimiento y la posición 5 a la de menor rendimiento.

A partir de este ordenamiento anual, se calculó la frecuencia con que cada localidad ocupó cada posición del ranking a lo largo de las 64 zafras analizadas. Este procedimiento permitió identificar si las diferencias de rendimiento entre localidades se mantuvieron estables en el tiempo o si, por el contrario, el orden relativo entre sitios presentó alta variabilidad interanual.

Adicionalmente, se estimó la correlación de Spearman entre los rankings de años consecutivos, con el fin de cuantificar la estabilidad temporal del ordenamiento relativo entre localidades. Valores cercanos a 1 indican una alta persistencia del ranking entre zafras consecutivas, mientras que valores más bajos reflejan cambios en la posición relativa de los sitios entre años. Finalmente, la distribución interanual del rendimiento bajo secano por localidad fue evaluada mediante gráficos de caja, con el objetivo de complementar el análisis de ranking y visualizar la separación entre ambientes.

3.4.4 Diagnósticos

En todos los modelos mixtos se evaluaron los supuestos de normalidad de residuos y de los efectos aleatorios mediante gráficos cuantil-cuantil, y la homogeneidad de varianzas mediante gráficos de residuos versus valores ajustados y residuos por nivel de los factores principales.

4. RESULTADOS

4.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

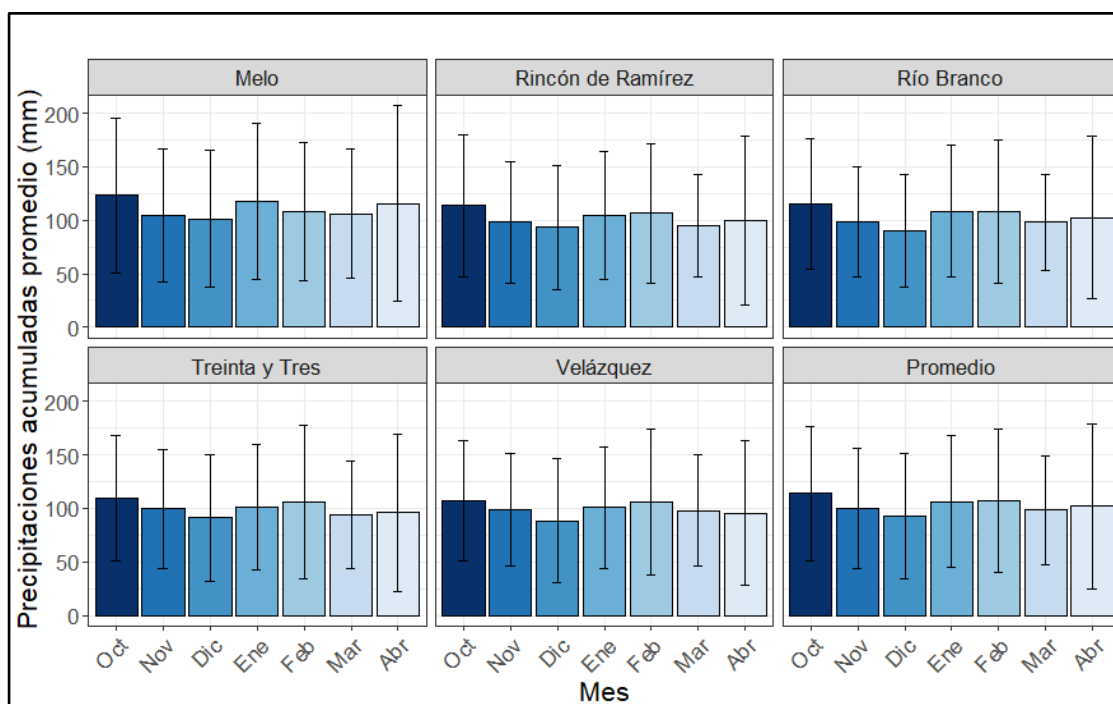
4.1.1 Precipitaciones

Durante el período crítico de definición de rendimiento del cultivo de soja (enero-marzo), las precipitaciones medias mensuales se situaron entre 94 y 117 mm, con coeficientes de variación entre 46 y 68% (Figura 1). Esta alta variabilidad es el rasgo climático más relevante para la producción del cultivo, ya que implica que el déficit o exceso hídrico durante la etapa de mayor sensibilidad es un evento frecuente en toda la región.

Para el conjunto de la estación de crecimiento (octubre–abril), las precipitaciones promedio mensuales oscilaron entre 88 y 123 mm, con desvíos estándar de 45 a 91 mm (CV: 46-79%). Los cinco sitios mostraron patrones estacionales similares y medias próximas entre sí, evidenciando relativa homogeneidad climática en la región (Figura 1).

Figura 1

Precipitaciones mensuales promedio (1960-2024) por localidad para la estación de crecimiento del cultivo de soja



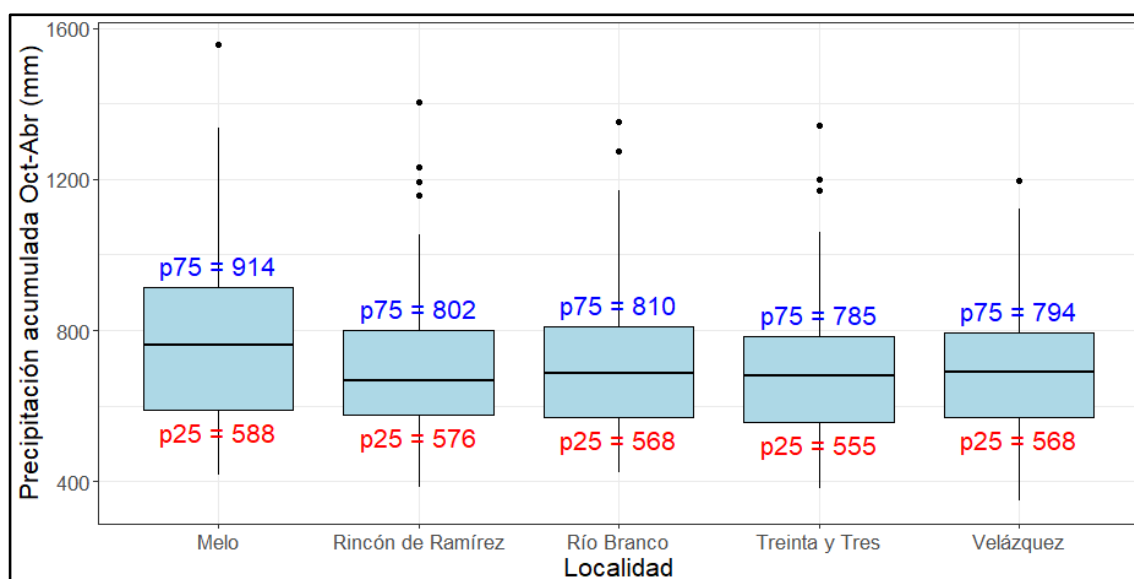
4.1.2 Categoría climática

La caracterización climática de las zafras se realizó a partir de la precipitación acumulada entre octubre y abril para cada localidad analizada. La precipitación media durante este período varió entre 696 y 778 mm, siendo Melo la localidad con mayor promedio (778 mm) y Velázquez la de menor valor (696 mm) (Figura 2).

Los percentiles utilizados como umbrales para la clasificación climática mostraron valores similares entre localidades. El percentil 25 (p25), correspondiente al límite inferior de los años secos, osciló entre 555 y 588 mm, mientras que el percentil 75 (p75), utilizado para identificar años lluviosos, mostró mayores diferencias variando entre 785 y 914 mm. En términos de variabilidad interanual, Melo presentó el mayor desvío estándar (229 mm), indicando una mayor amplitud en la distribución de las precipitaciones, mientras que Velázquez mostró la menor variabilidad (178 mm). Estos umbrales resultan relevantes en el contexto productivo: los años clasificados como secos (precipitación < p25, umbral de 555–588 mm) se corresponden con condiciones donde el déficit hídrico durante el ciclo tiende a ser un factor limitante del rendimiento, mientras que los años lluviosos (precipitación > p75, umbral de 785–914 mm) pueden asociarse a mayor riesgo de exceso hídrico, particularmente en suelos de drenaje imperfecto como los de los sitios de Melo y Velázquez.

Figura 2

Distribución de la precipitación Octubre - Abril utilizada para la caracterización climática de las zafras



4.1.3 Relación entre la fase ENSO y las categorías climáticas observadas

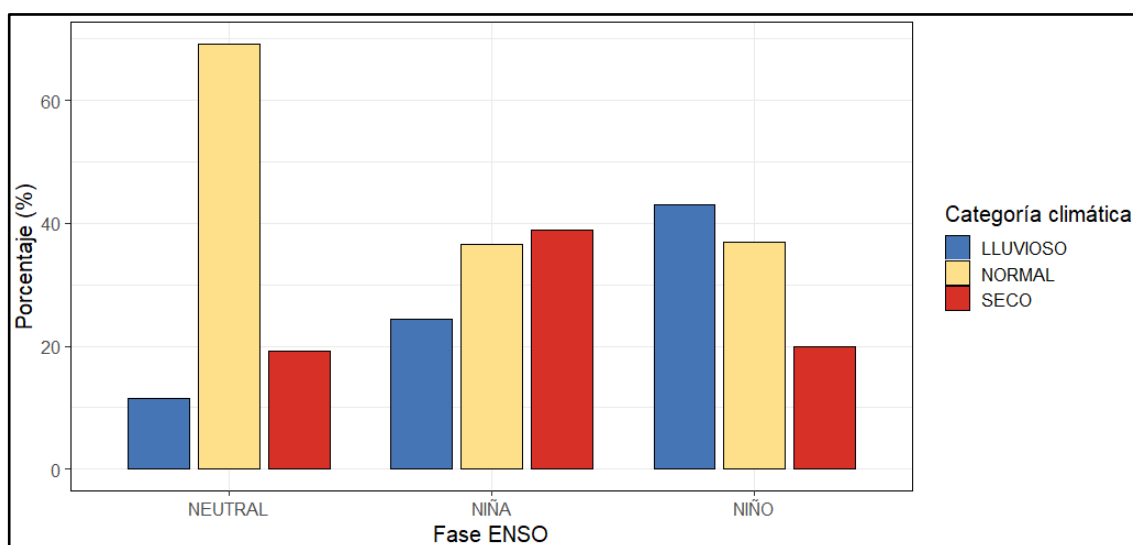
La distribución de las categorías climáticas observadas durante el trimestre diciembre-enero-febrero (DEF) mostró diferencias claras entre las fases ENSO determinadas en agosto-setiembre-octubre (ASO) (Figura 3). Durante los años clasificados como neutrales predominó ampliamente la categoría normal, representando el 69,2% de los casos, mientras que las categorías lluvioso y seco alcanzaron el 11,5% y 19,2%, respectivamente.

En los años Niña se observó una mayor frecuencia de condiciones secas (38,9%), seguida por las condiciones normales (36,7%) y lluviosas (24,4%). Por el contrario, durante los años Niño la categoría más frecuente fue lluvioso, representando el 43,0% de los casos, mientras que las categorías normal y seco correspondieron al 37,0% y 20,0%, respectivamente.

En conjunto, la asociación entre la fase ENSO (ASO) y la categoría climática observada en DEF fue consistente con lo esperado: los años Niño presentaron condiciones secas solo el 20% de las zafas, mientras que los años Niña presentaron condiciones lluviosas solo del 25% de las zafas (Figura 3). Si bien la asociación no es determinista, el 57% de los años Niño no fueron lluviosos, la fase ENSO observada en el trimestre previo al inicio del verano ofrece información útil para anticipar parcialmente el régimen hídrico estival y orientar decisiones de manejo.

Figura 3

Distribución porcentual de las categorías de precipitación observadas durante DEF según la fase ENSO en ASO



4.1.4 Temperatura y amplitud térmica

Las temperaturas promedio durante la estación de crecimiento (octubre–abril) fueron similares entre localidades para la mayoría de las variables analizadas (Figura 4). La temperatura media general osciló entre 20,1 °C (Velázquez) y 21,1 °C (Río Branco), la temperatura mínima entre 15,4 y 17,4 °C, y la temperatura máxima entre 24,8 y 25,3 °C. Río Branco se diferenció de los demás sitios por presentar la mayor temperatura mínima y la menor amplitud térmica (7,4 °C vs. 8,9-9,6 °C en las demás localidades) (Figura 5), comportamiento que podría asociarse a características topográficas o de proximidad a cursos de agua locales.

Figura 4

Temperatura máxima, media y mínima promedio (1960-2024) por localidad para el período Octubre-Abril

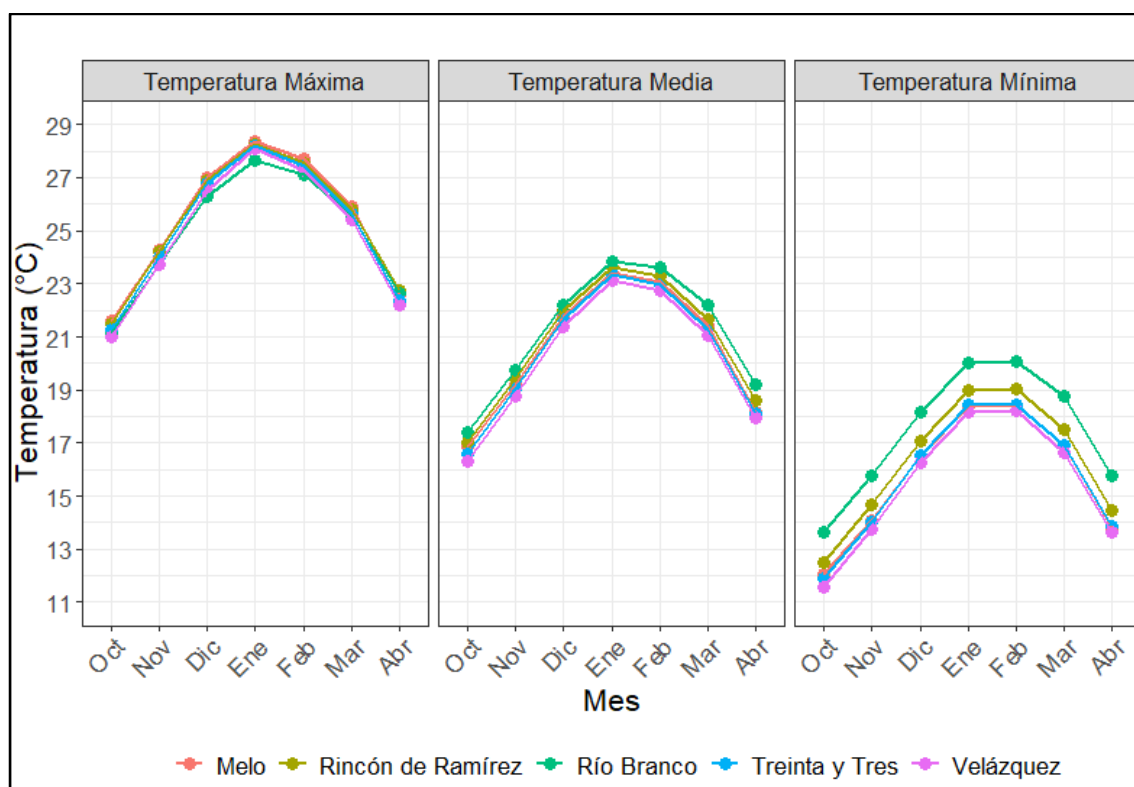
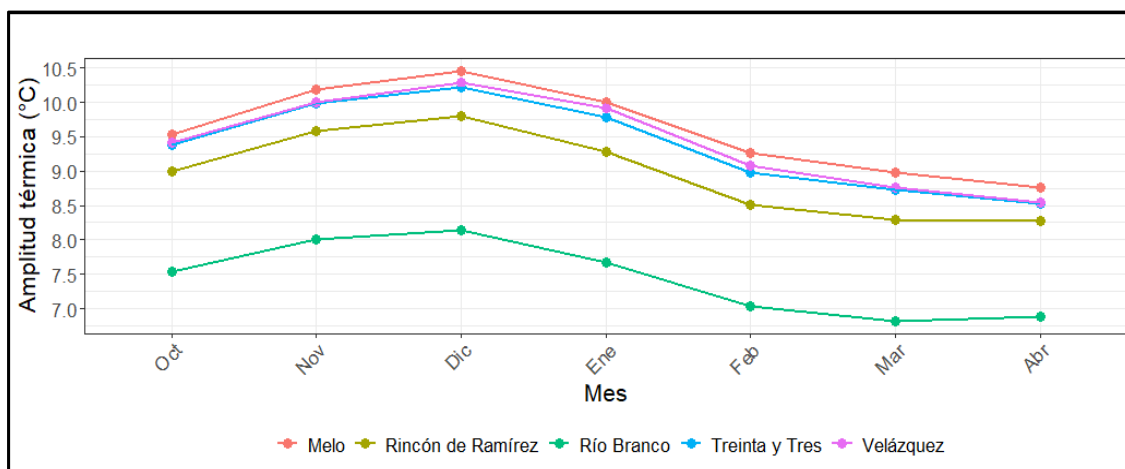


Figura 5

Amplitud térmica promedio (1960-2024) por localidad para el período Octubre-Abril

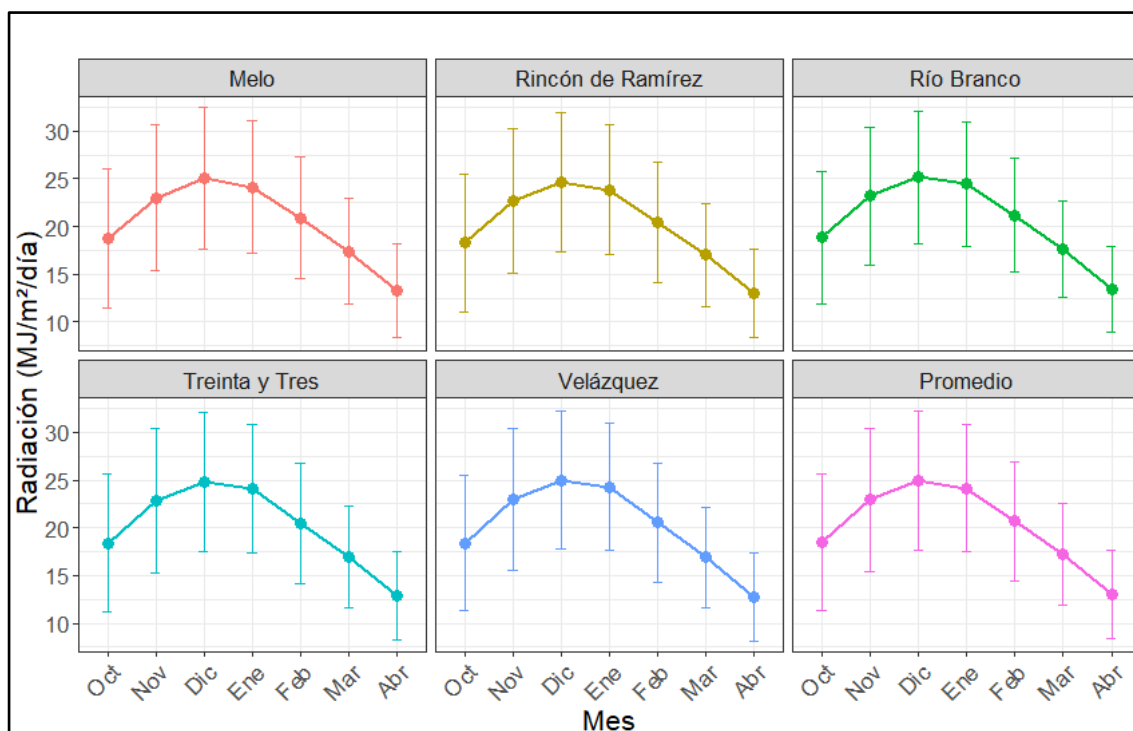


4.1.5 Radiación solar incidente

La radiación solar promedio durante el período octubre-abril presentó un patrón bien definido, con un aumento desde la primavera hacia el verano y una disminución progresiva hacia el otoño (Figura 6). En el promedio de las cinco localidades, la radiación media general fue de 20,2 MJ m⁻² día⁻¹, alcanzando su valor máximo en diciembre (24,9 MJ m⁻² día⁻¹) y el mínimo en abril (13,1 MJ m⁻² día⁻¹). No se registraron diferencias marcadas en los valores medios de radiación entre sitios, dado que la variación observada entre localidades fue de sólo 0,6 MJ m⁻² día⁻¹, lo que sugiere que la oferta lumínica disponible para el crecimiento del cultivo es comparable en toda la región.

Figura 6

Radiación solar promedio (1960-2024) por localidad para el período Octubre-Abril



En resumen, para el período analizado no se observaron diferencias climáticas marcadas entre las localidades en términos de precipitaciones, temperatura media, temperatura máxima y radiación solar, ya que estas variables mostraron patrones estacionales similares y valores medios próximos entre sitios. Sin embargo, se identificó una tendencia consistente en la temperatura mínima y en la amplitud térmica, destacándose Río Branco por presentar temperaturas mínimas relativamente más altas y una menor amplitud térmica en comparación con las demás localidades. En conjunto, estos resultados indican que la región Este presenta condiciones climáticas relativamente homogéneas, aunque con una variabilidad interanual importante en los parámetros analizados. Dicha variabilidad puede incidir de manera significativa en distintos momentos del ciclo del cultivo de soja.

4.2 RENDIMIENTO DE SOJA EN CONDICIONES DE RIEGO Y SECANO

4.2.1 Efecto del sistema hídrico y la localidad sobre el rendimiento

El rendimiento de soja simulado presentó diferencias marcadas entre condiciones hídricas y sitios a lo largo de las 64 zafras evaluadas (Figura 7). En promedio, los rendimientos bajo riego (Y_p) fueron 25,5% mayores que los de secano (Y_w) (4.53 vs 3.61 Mg ha^{-1}) y más estables entre años (CV: 8,4% vs 21,4%), evidenciando una doble ventaja del sistema irrigado. La mayor inestabilidad bajo secano se asocia a la ocurrencia de años con déficit hídrico severo, particularmente durante el período crítico de definición de rendimiento. Esta doble ventaja se observa en la Figura 7 donde las cajas bajo riego son más angostas y sus medianas más altas que bajo secano en los cinco sitios, y los valores atípicos (rendimientos extremadamente bajos) son exclusivos de las condiciones de secano.

A nivel de los sitios, el patrón se mantuvo consistente, en todos los casos el rendimiento medio bajo riego superó significativamente al de secano ($p < 0.001$), con medias que oscilaron entre 3.09 Mg ha^{-1} (Melo) y 4.16 Mg ha^{-1} (Río Branco) bajo secano, y entre 4.23 Mg ha^{-1} (Melo) y 4.83 Mg ha^{-1} (Río Branco) bajo riego (Figura 7, Anexo A). Las brechas estimadas entre sistemas variaron entre 0.67 Mg ha^{-1} (Río Branco) y 1.13 Mg ha^{-1} (Melo), confirmando que el beneficio del riego no fue uniforme entre localidades (IC95% presentados en Figura 8). En cuanto a la variabilidad interanual, el CV bajo secano osciló entre 16,5-27,4%, mientras que bajo riego los valores fueron más bajos y homogéneos entre sitios, con un rango entre 7,2-9,9%.

El modelo lineal mixto reveló efectos significativos del sistema hídrico ($p < 0.001$), la localidad ($p < 0.001$) y su interacción ($p < 0.001$). La significancia de la interacción indica que la magnitud del efecto del riego sobre el rendimiento no fue uniforme entre localidades, por lo que los contrastes se analizaron de forma independiente para cada sitio.

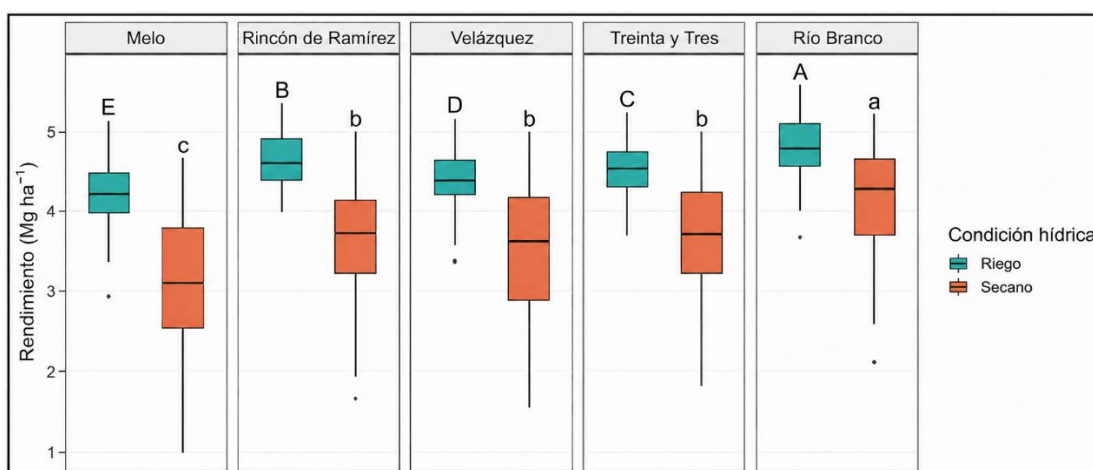
La varianza asociada a la zafra ($\sigma^2 = 0.233$) superó ampliamente a la varianza residual ($\sigma^2 = 0.131$), resultando en un coeficiente de correlación intraclase de 0.64, lo que indica que el 64% de la variabilidad total del rendimiento es atribuible a la variación climática interanual, lo cual justifica el tratamiento de la zafra como efecto aleatorio en el modelo. Los diagnósticos del modelo evidenciaron que la variabilidad del rendimiento entre zafras no fue igual entre los sistemas hídricos. En condiciones de secano, la dispersión interanual de los rendimientos fue considerablemente mayor en comparación a condiciones de riego. Esta heterogeneidad de varianzas fue confirmada por el test de Levene en todas las localidades ($p < 0.001$). Por este motivo, el modelo fue reajustado

permitiendo estimar una varianza residual específica por sistema en lugar de asumir una varianza común. La desviación estándar residual bajo riego representó el 23,5% de la correspondiente al secano (0.14 vs 0.60 Mg ha^{-1}), lo cual demuestra el efecto que tiene el riego en la estabilización del rendimiento y en la menor dependencia a la variabilidad climática interanual.

Los contrastes entre sistemas dentro de cada localidad, derivados del Modelo B confirmaron que las brechas estimadas entre sistemas variaron entre 0.67 Mg ha^{-1} en Río Branco (IC95%: 0.52 - 0.82) y 1.13 Mg ha^{-1} en Melo (IC95%: 0.98 - 1.29), siendo 0.92 Mg ha^{-1} la brecha promedio (Figura 8). La heterogeneidad de la respuesta al riego entre localidades se identificó a partir de tres grupos estadísticamente distinguibles, Melo con la mayor brecha (grupo a), Río Branco con la menor (grupo c), y las tres localidades restantes en una posición intermedia (grupo b) (Anexo A, Figura 8).

Figura 7

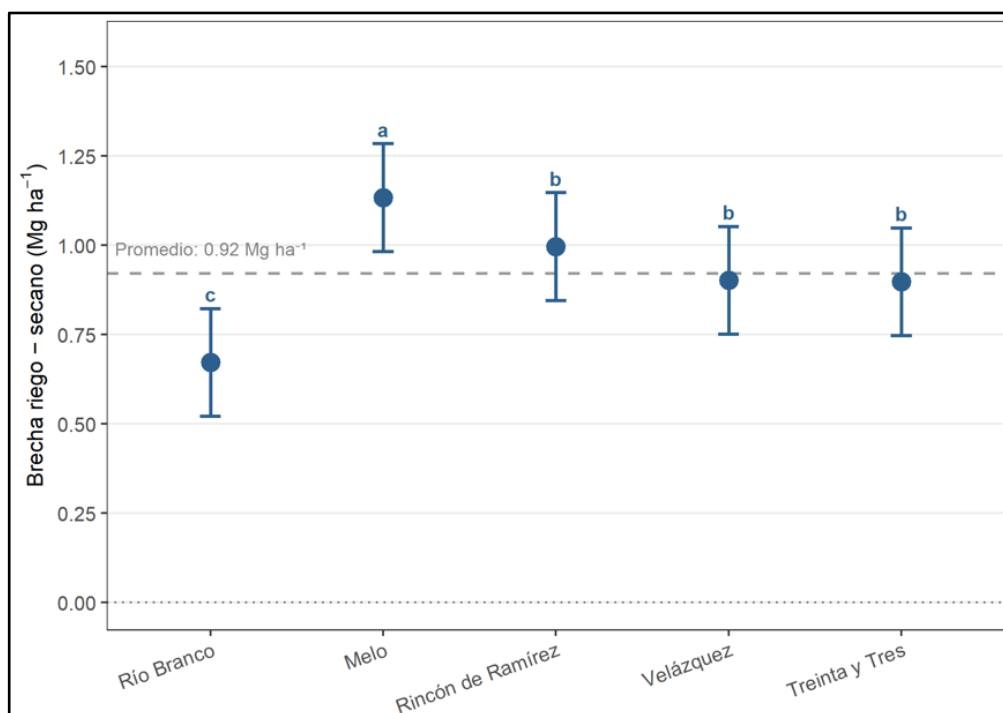
Media y distribución del rendimiento estimado de soja por localidad y condición hídrica



Nota. Letras mayúsculas y minúsculas indican diferencias significativas entre localidades dentro de cada condición hídrica (prueba de Tukey, $\alpha = 0.05$).

Figura 8

Brecha de rendimiento estimada (riego – seco) del cultivo de soja por localidad



Nota. La línea gris punteada indica la brecha promedio general (0.92 Mg ha⁻¹). Letras distintas indican diferencias significativas entre localidades (prueba de Tukey, $\alpha = 0.05$).

4.2.2 Comparación del rendimiento entre localidades dentro de cada condición hídrica

Al analizar los rendimientos medios entre localidades para cada sistema hídrico se observaron diferencias marcadas según la condición hídrica (Figura 7). En condiciones de seco, se identificaron tres grupos mediante la prueba de Tukey. Melo constituyó el grupo de menor rendimiento estimado (3.09 Mg ha⁻¹; grupo c), diferenciándose estadísticamente de todas las demás localidades ($p < 0.001$). Río Branco fue el sitio de mayor productividad estimada (4.16 Mg ha⁻¹; grupo a), también diferenciándose del resto ($p < 0.001$). Las tres localidades restantes, Rincón de Ramírez (3.66 Mg ha⁻¹), Treinta y Tres (3.65 Mg ha⁻¹) y Velázquez (3.50 Mg ha⁻¹), conformaron un grupo de rendimiento intermedio en el cual no existieron diferencias estadísticas entre sí (grupo b; $p > 0.05$). Por otro lado, bajo condiciones de riego, todas las localidades difirieron significativamente entre sí ($p < 0.001$), formando así cinco grupos estadísticamente diferentes. En esta situación, el rendimiento estimado en Río Branco (4.83 Mg ha⁻¹) fue 3,6%, 6,2%, 9,8% y 14,2% mayor que en Rincón de Ramírez, Treinta y Tres, Velázquez y Melo respectivamente.

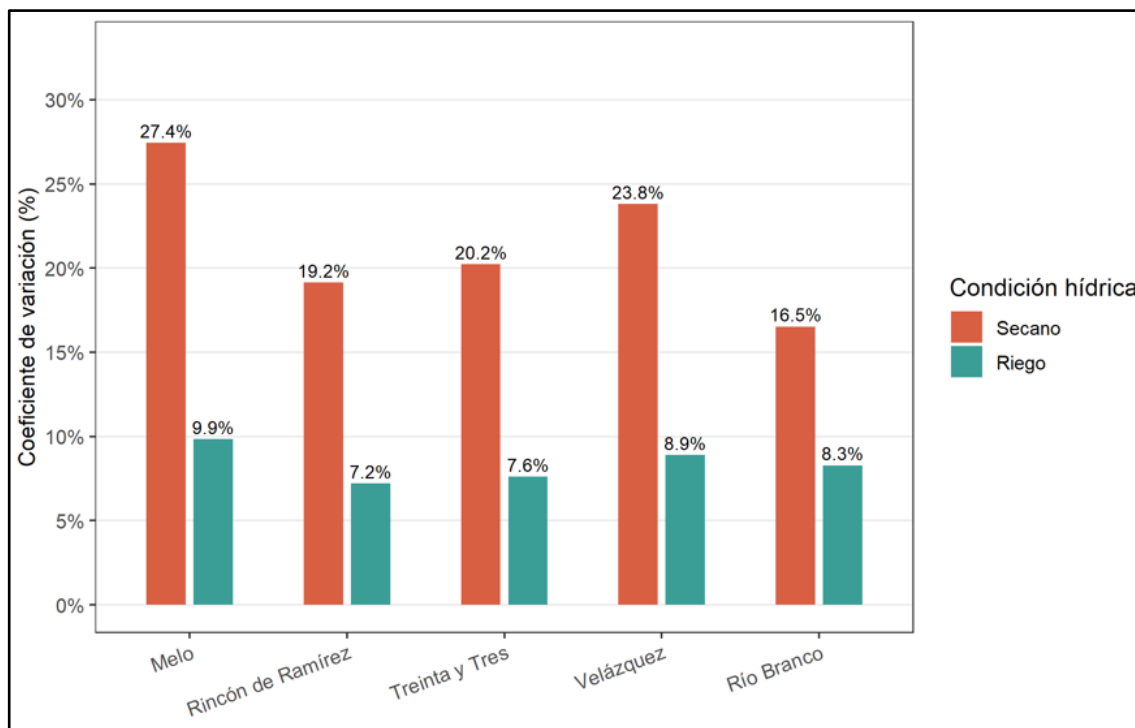
4.2.3 Variabilidad interanual del rendimiento por localidad y condición hídrica

El análisis de la variabilidad interanual del rendimiento evidenció diferencias consistentes entre sistemas hídricos en todas las localidades (Figura 9). El test de Levene confirmó formalmente que las varianzas entre condiciones hídricas fueron significativamente heterogéneas en los cinco sitios ($p < 0.001$). Los coeficientes de variación oscilaron entre 16,5% (Río Branco) y 27,4% (Melo) bajo secano, y entre 7,2% (Rincón de Ramírez) y 9,9% (Melo) bajo riego, con el secano presentando una variabilidad aproximadamente 2.0 a 2.8 veces mayor que el riego. Melo fue la localidad con mayor diferencia relativa entre sistemas, donde el CV bajo secano (27,4%) casi triplicó al registrado bajo riego (9,9%). Por el contrario, Río Branco presentó la menor diferencia entre sistemas (16,5% vs 8,3%). Cabe destacar que bajo riego los CV fueron notablemente homogéneos entre localidades (rango: 7,2-9,9%), mientras que bajo secano la dispersión entre sitios fue considerablemente mayor (rango: 16,5-27,4%), indicando que el riego no solo redujo la variabilidad interanual sino que también homogeneizó la estabilidad productiva entre localidades. Este resultado es consistente con el elevado coeficiente de correlación intraclase (ICC = 0.64, reportado en la sección 4.2.1), que confirma que el clima interanual, precisamente el factor que el riego logra amortiguar, explica la mayor parte de la variabilidad total del rendimiento. En conjunto, estos resultados indican que el riego ejerce un doble efecto sobre el rendimiento al incrementar el nivel productivo medio y reducir considerablemente la variabilidad interanual.

Al analizar la variabilidad interanual del rendimiento en función de la fecha de siembra (Tabla 6), se observaron patrones diferenciados entre sistemas hídricos. Bajo secano, el CV disminuyó de forma consistente a medida que se atrasó la fecha de siembra, pasando de 24,3% en la siembra del 15 de octubre a 18,4% en la siembra del 30 de diciembre, promediando las cinco localidades. Este patrón indica que las siembras tardías generan sistemas productivos más estables interanualmente bajo secano, aunque a costa de un menor rendimiento medio. Bajo riego, en cambio, el CV se mantuvo prácticamente constante entre fechas de siembra, oscilando en un rango de 8,7-9,4%, lo que indica que el riego elimina el efecto de la fecha de siembra sobre la estabilidad productiva.

Figura 9

Coeficiente de variación (%) del rendimiento estimado de soja por localidad y condición hídrica



Nota. Los valores sobre cada barra indican el CV (%) correspondiente.

Tabla 6

Coeficiente de variación (%) del rendimiento simulado de soja por fecha de siembra y condición hídrica

Fecha de siembra	CV Secano	CV Riego
15-Oct	24,3%	8,8%
30-Oct	24,0%	8,7%
15-Nov	23,7%	8,9%
30-Nov	22,1%	8,7%
15-Dic	20,2%	8,8%
30-Dic	18,4%	9,4%

4.2.4 Rendimiento en relación a la condición climática y la condición hídrica

El análisis del efecto de la disponibilidad hídrica sobre el rendimiento reveló una interacción significativa entre la categoría climática y el sistema hídrico. Esto se confirmó mediante el test de verosimilitud, donde el modelo con interacción sistema x categoría climática presentó un ajuste significativamente superior al modelo sin interacción ($\Delta AIC = 933$; $\chi^2 = 937.2$; $p < 0.001$), indicando que el efecto del clima sobre el rendimiento no fue el mismo bajo riego y secano. Esta interacción fue confirmada por el análisis de varianza tipo III ($p < 0.001$).

Las medias estimadas por sistema hídrico y categoría climática se presentan en la Figura 10. En años secos, el riego generó la mayor brecha respecto al secano (1.53 Mg ha^{-1} ; $p < 0.001$), con un rendimiento bajo riego 49,4% mayor que sobre secano (3.10 Mg ha^{-1}). En años normales, la brecha se redujo a 23% (4.54 vs 3.69 Mg ha^{-1} ; $p < 0.001$). En años lluviosos, la diferencia fue de solo 11,1% (4.41 vs 3.97 Mg ha^{-1} ; $p < 0.001$), representando una reducción del 71% respecto a los años secos. Este patrón decreciente de la brecha a medida que aumenta la disponibilidad hídrica demuestra que el impacto productivo del riego es mayor cuando el déficit hídrico es severo y menor cuando las precipitaciones cubren la demanda del cultivo.

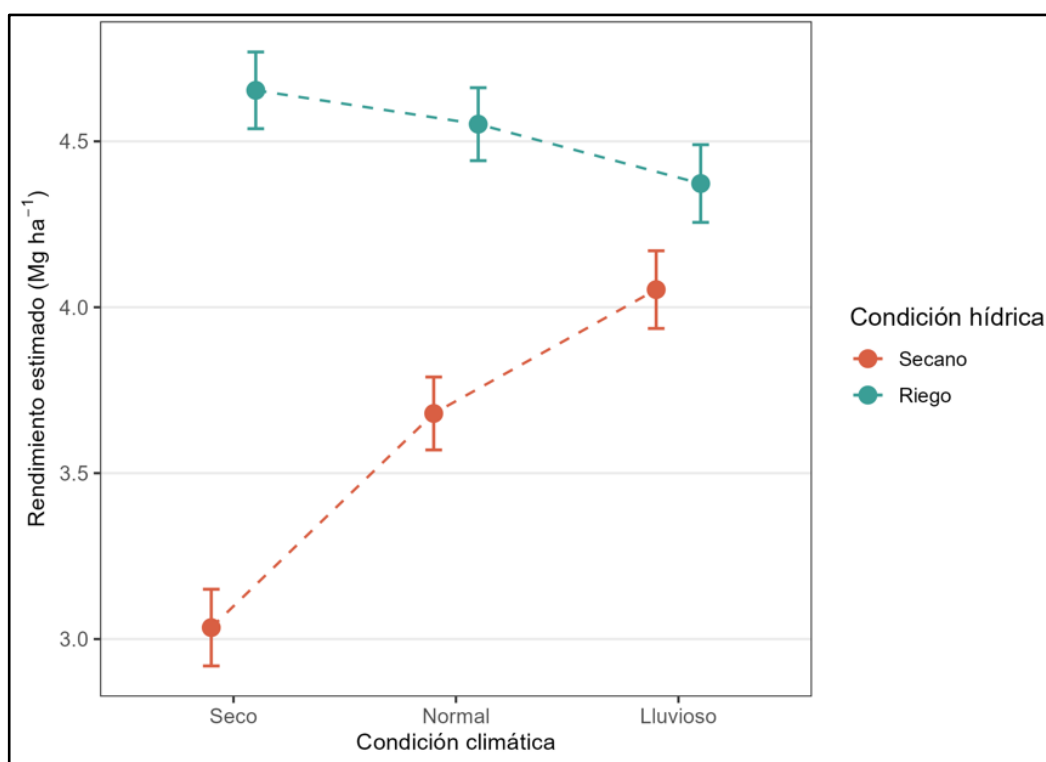
El comportamiento de cada sistema frente al clima fue considerablemente diferente. El rendimiento bajo secano presentó una fuerte dependencia del régimen hídrico, variando entre 3.10 Mg ha^{-1} en años secos y 3.97 Mg ha^{-1} en años lluviosos, lo que representa una diferencia de 0.87 Mg ha^{-1} (+28 %). En contraste, el rendimiento bajo riego presentó una respuesta inversa y de menor magnitud, disminuyendo de 4.63 Mg ha^{-1} en años secos a 4.41 Mg ha^{-1} en años lluviosos, con una reducción de apenas 0.22 Mg ha^{-1} (-5,0%). Esta respuesta inversa del rendimiento bajo riego en años lluviosos podría atribuirse, al menos en parte, a efectos del exceso hídrico sobre la aireación del suelo en localidades con drenaje imperfecto, proceso que el modelo Cycles captura de forma limitada; esta hipótesis se retoma en la Discusión.

La sensibilidad al déficit hídrico, medida como la diferencia de rendimiento bajo secano entre años lluviosos y secos, varió de 41% en Melo a 21% en Río Branco, confirmando que ambas localidades representan los extremos del gradiente de sensibilidad hídrica en la región. Los rendimientos mínimos observados en años secos bajo secano oscilaron entre 0.92 Mg ha^{-1} (Melo) y 2.04 Mg ha^{-1} (Río Branco), diferencia que ilustra el impacto del ambiente edáfico sobre el piso productivo del sistema (Anexo B).

En términos generales, el beneficio del riego aumenta a medida que la disponibilidad hídrica se torna más restrictiva. A su vez, este sistema logró incrementar el rendimiento medio y el mínimo productivo, además de reducir la variabilidad interanual, y por ende la sensibilidad en años de déficit hídrico. En contraste, en seco el clima se convierte en el principal determinante tanto del rendimiento medio como de su variabilidad, con consecuencias especialmente marcadas en las localidades de mayor sensibilidad hídrica como Melo y Velázquez.

Figura 10

Rendimiento estimado por condición climática y sistema hídrico con intervalos de confianza al 95%



Nota. Los valores representan medias marginales estimadas mediante el modelo lineal mixto, ajustadas por el efecto de localidad y zafra. Las líneas punteadas conectan las medias estimadas dentro de cada sistema hídrico para ilustrar la dirección de la interacción entre categoría climática y condición hídrica.

4.2.5 Efecto de la fecha de siembra sobre el rendimiento

En todas las localidades y bajo ambos sistemas hídricos, el rendimiento disminuyó de forma continua a medida que se atrasó la fecha de siembra (Figuras 11 y 12), siendo la siembra temprana (15 de octubre) consistentemente superior a la tardía (30 de diciembre) en todas las combinaciones de sitio y condición hídrica evaluadas. La

magnitud de esta pérdida fue modulada por la interacción entre el sistema hídrico y la categoría climática, cuya triple interacción resultó significativa ($F = 12.2$; $p < 0.001$).

Las pendientes estimadas mediante el modelo mixto difirieron significativamente entre sistemas y categorías climáticas (Figura 12, Tabla 7). Bajo riego, las pendientes fueron negativas y relativamente homogéneas entre categorías climáticas, oscilando entre $-0.0224 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ en años secos y $-0.0292 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ en años lluviosos, aunque las tres categorías difirieron significativamente entre sí ($p < 0.01$ en todos los contrastes). Esto implica que cada 15 días de atraso en la fecha de siembra el rendimiento bajo riego se redujo entre 0.33 y 0.44 Mg ha^{-1} según la categoría climática. En contraste, bajo secano las pendientes mostraron una marcada dependencia de la categoría climática, variando entre $-0.0079 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ en años secos y $-0.0223 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ en años lluviosos, con diferencias entre categorías 2-3 veces mayores que las observadas bajo riego ($p < 0.001$ en todos los contrastes). En años secos bajo secano la pérdida asociada al atraso fue de apenas 0.12 Mg ha^{-1} cada 15 días, reflejando que cuando la disponibilidad hídrica es el factor limitante dominante la fecha de siembra pierde relevancia relativa como determinante del rendimiento. El gradiente de R^2 observado en la Tabla 7 muestra que, bajo riego en años lluviosos, el 79% de la variabilidad del rendimiento entre fechas queda explicado por la fecha de siembra ($R^2 = 0.79$), mientras que bajo secano en años secos este valor desciende a apenas 5% ($R^2 = 0.05$). Este contraste evidencia que la fecha de siembra es un determinante relevante del rendimiento cuando la disponibilidad anexo hídrica no es limitante, pero pierde casi toda su influencia cuando el déficit hídrico domina el sistema.

A nivel de localidades (Anexo C), bajo riego el rendimiento en la siembra más temprana (DOY 288) varió entre 5.11 Mg ha^{-1} (Melo) y 5.84 Mg ha^{-1} (Río Branco), y descendió a $3.29\text{-}3.75 \text{ Mg ha}^{-1}$ en la siembra más tardía (DOY 364), implicando una pérdida absoluta de entre 1.8 y 2.2 Mg ha^{-1} según el sitio. Bajo secano el rango fue de $3.55\text{-}4.82 \text{ Mg ha}^{-1}$ en la siembra temprana y de $2.61\text{-}3.44 \text{ Mg ha}^{-1}$ en la tardía, con pérdidas de menor magnitud absoluta ($0.9\text{-}1.2 \text{ Mg ha}^{-1}$). En todos los casos el orden jerárquico entre localidades se mantuvo estable entre fechas.

Tabla 7

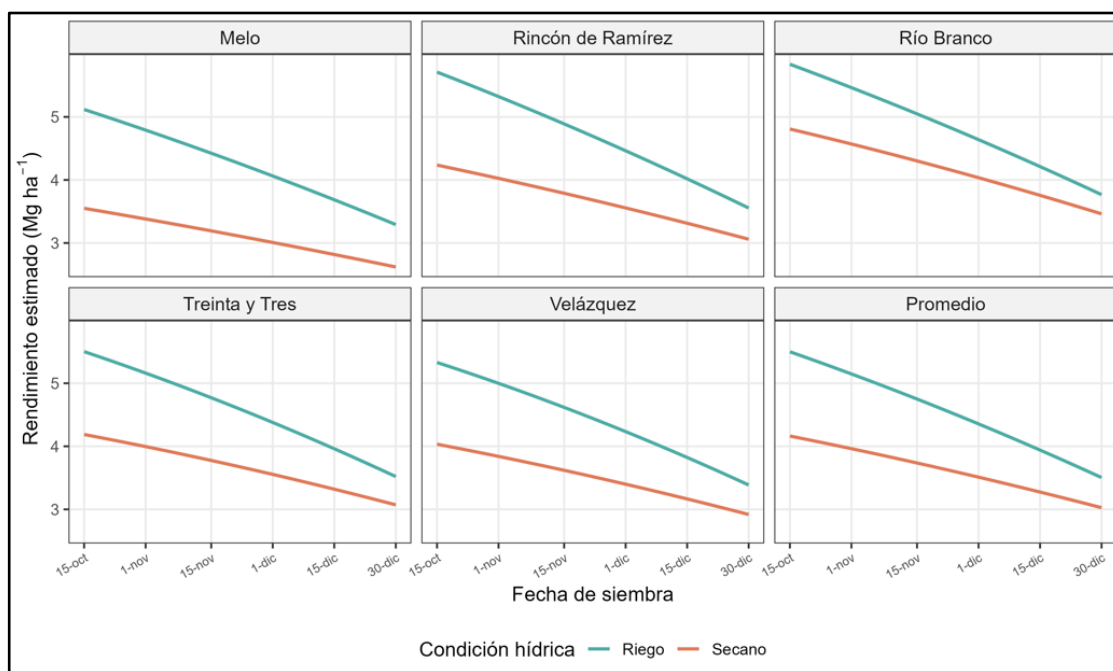
Pendientes estimadas de la relación entre fecha de siembra y rendimiento estimado de soja

Sistema	Categoría	Pendiente (Mg ha⁻¹ día⁻¹)	Pérdida 15 días (Mg ha⁻¹)	R²	Grupo
Riego	Lluvioso	-0.0292	0.44	0.79	a
Riego	Normal	-0.0266	0.40	0.73	b
Riego	Seco	-0.0224	0.34	0.54	c
Secano	Lluvioso	-0.0223	0.33	0.45	a
Secano	Normal	-0.0147	0.22	0.20	b
Secano	Seco	-0.0079	0.12	0.05	c

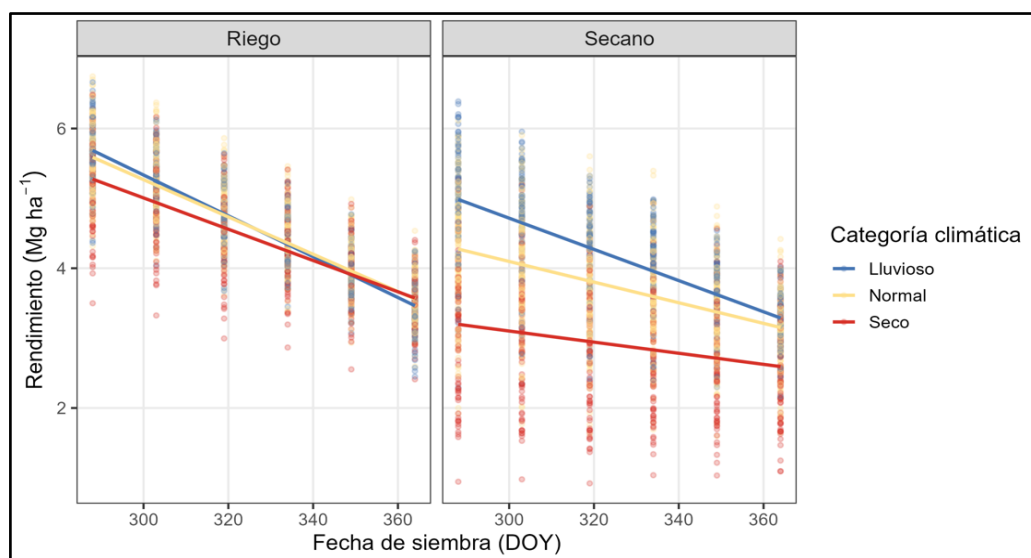
Nota. Pendientes estimadas mediante modelo lineal mixto con efecto aleatorio de zafra. R² calculado mediante regresión lineal simple por subgrupo (ver sección 3.4.3.4). Las letras indican grupos de comparación dentro de cada sistema hídrico por separado (prueba de Tukey, $\alpha = 0.05$); las letras no son comparables entre sistemas.

Figura 11

Rendimiento estimado en función de la fecha de siembra por localidad y condición hídrica

**Figura 12**

Relación entre fecha de siembra y rendimiento soja bajo riego y secano según categoría climática



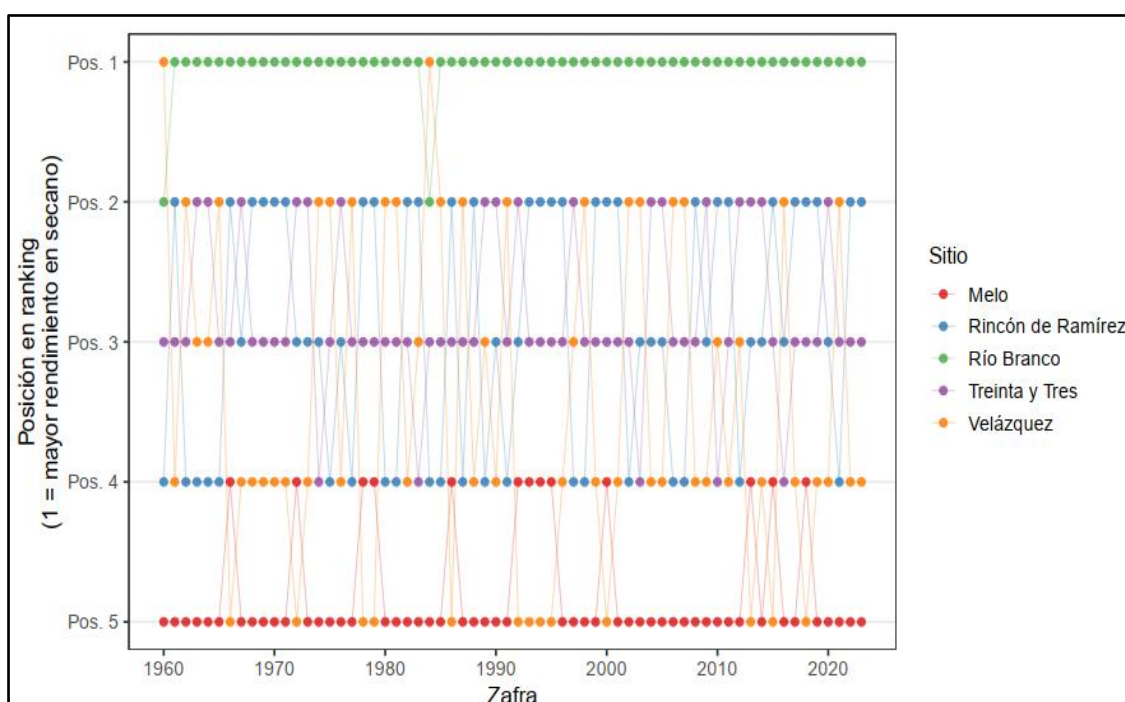
Nota. Las curvas representan ajustes polinomiales (lineal + cuadrático) mediante regresión local para visualización. Las pendientes reportadas en Tabla 7 provienen del modelo lineal mixto y pueden diferir levemente de la visualización gráfica.

4.2.6 Estabilidad del ranking de rendimiento entre localidades

El análisis de la estabilidad del ranking de rendimiento bajo secano entre localidades mostró que el orden de los sitios fue consistente a lo largo de las 64 zafras evaluadas, con una correlación de Spearman media entre años consecutivos de 0.76 (rango: 0,30-1,00). Río Branco ocupó el primer lugar en 62 de las 64 zafras (96,9%) y nunca cayó al último puesto, mientras que Melo se ubicó en el último lugar en el 79,7% de las zafras y nunca alcanzó el primero (Figura 13). Los sitios con posiciones intermedias (Rincón de Ramírez, Treinta y Tres y Velázquez) presentaron mayor variabilidad en su ranking, intercambiándose entre las posiciones 2 y 4 a lo largo de los años. La distribución interanual del rendimiento bajo secano confirmó la separación entre los extremos del ranking, siendo Río Branco y Melo los sitios con las distribuciones de rendimiento más diferenciadas (Figura 14).

Figura 13

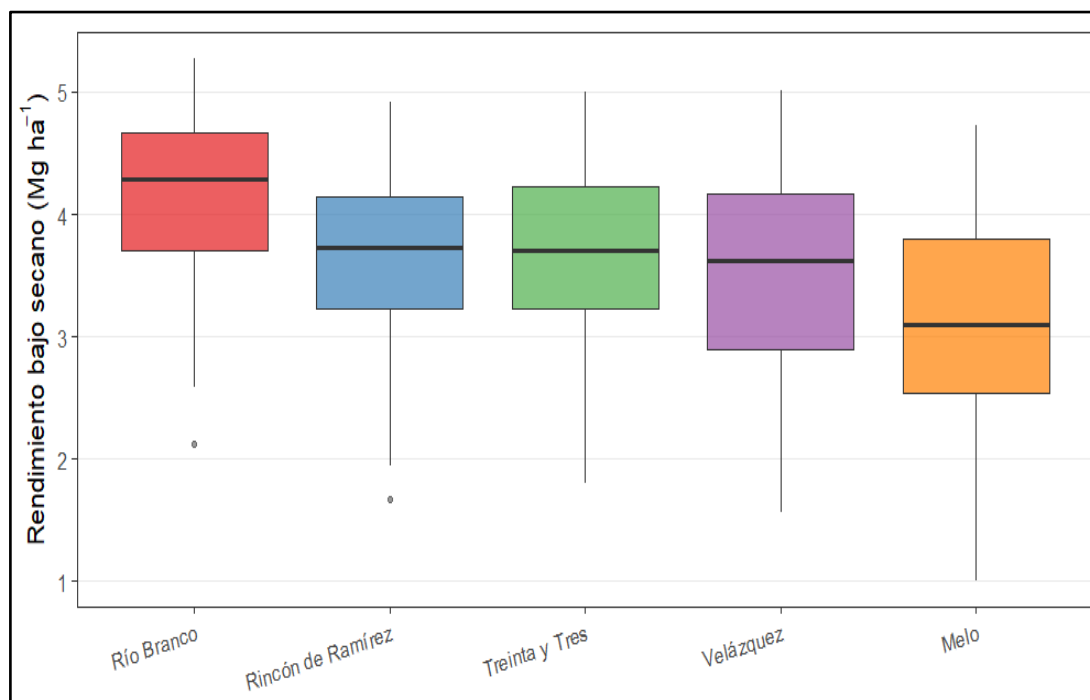
Estabilidad del ranking de rendimiento bajo secano por zafra evaluando la posición de cada localidad



Nota. Cada línea representa una localidad; el eje vertical indica la posición en el ranking (1 = mayor rendimiento bajo secano). La correlación de Spearman media entre años consecutivos fue de 0,76 (rango: 0,30-1,00).

Figura 14

Distribución interanual del rendimiento bajo secano por localidad, ordenadas por mediana descendente



Nota. Las cajas representan el rango intercuartílico; la línea central indica la mediana. Los puntos representan valores atípicos.

5. DISCUSIÓN

5.1 Diferencias entre localidades - rol del suelo y el clima

Los resultados indicaron que el rendimiento de soja varió significativamente entre las cinco localidades evaluadas, tanto bajo condiciones de riego como de secano, evidenciando que el ambiente productivo ejerce una influencia determinante sobre el rendimiento potencial (Y_p) y el rendimiento potencial limitado por agua (Y_w) del cultivo. Este comportamiento diferencial entre sitios puede atribuirse a la interacción entre las propiedades edáficas de cada unidad de suelo y las condiciones climáticas locales, en particular la disponibilidad hídrica.

El hecho de que las localidades de mayor (Río Branco) y menor productividad estimada (Melo) fueran las mismas tanto en condiciones de riego como en secano podría estar relacionado en parte con las características edáficas de los suelos dominantes en cada sitio. El suelo de Río Branco presenta una mayor proporción de arena en los horizontes superficiales, lo que podría favorecer la aireación del perfil. En contraste, la unidad Lechiguana asociada a Melo presenta mayores contenidos de arcilla en los horizontes superficiales e intermedios, característica que podría influir sobre la dinámica del agua y la aireación del suelo. No obstante, los resultados obtenidos no permiten identificar de manera aislada los mecanismos responsables de las diferencias entre localidades.

Melo y Velázquez presentaron los mayores coeficientes de variación bajo secano (27,4% y 23,8%, respectivamente) (Figura 9) y las mayores diferencias de rendimiento entre años lluviosos y secos (41% y 36%, respectivamente). Este comportamiento sugiere una mayor sensibilidad de ambos ambientes frente a la variabilidad hídrica interanual. En este sentido, el concepto de “doble riesgo” planteado por Macedo y Terra (2014) para los suelos del este del Uruguay aporta un marco general de interpretación, dado que la productividad de la región puede verse afectada tanto por déficits como por excesos de agua. Sin embargo, los resultados obtenidos no permiten separar el efecto relativo de ambos tipos de estrés en cada localidad.

Si bien Río Branco presentó temperaturas mínimas promedio más elevadas (17,4 °C) y una menor amplitud térmica (7,4 °C) en comparación con las demás localidades, las diferencias térmicas observadas no parecen suficientes para explicar por sí solas las variaciones de rendimiento entre sitios (Figura 4 y 5). Las temperaturas mínimas difirieron en menos de 2 °C entre localidades, con valores comprendidos entre 15,4 y 17,4 °C, mientras que las temperaturas medias y máximas fueron prácticamente homogéneas, con variaciones de aproximadamente 1 °C y 0,5 °C, respectivamente. En

este contexto, es probable que las diferencias de rendimiento entre ambientes estén más estrechamente asociadas a la disponibilidad hídrica y a las propiedades edáficas que regulan la dinámica del agua en el suelo. Esta interpretación es consistente con el marco planteado por Lobell et al. (2009) y van Ittersum et al. (2013) quienes señalan que el rendimiento potencial limitado por agua depende de las precipitaciones y de características del suelo como la textura, la capacidad de almacenamiento de agua y la profundidad efectiva de exploración radicular. Del mismo modo, en condiciones de producción de soja en Uruguay, la deficiencia hídrica ha sido identificada como una de las principales limitantes del rendimiento (Giménez, 2014).

En conjunto, los resultados señalan que la variabilidad espacial del rendimiento en la región este responde a una combinación de factores edáficos y climáticos que actúan de forma conjunta. En una región donde las diferencias climáticas entre localidades son moderadas, las características de cada ambiente productivo condicionan la respuesta del cultivo a la disponibilidad hídrica y determinan en qué medida la variabilidad interanual de las precipitaciones se traduce en cambios de rendimiento. Desde una perspectiva productiva, estos resultados indican que las estrategias de manejo no deberían definirse de manera uniforme para toda la región, sino ajustarse a las características de cada ambiente. La caracterización previa de cada ambiente, particularmente en relación con la capacidad de almacenamiento de agua y el drenaje del suelo, puede contribuir a orientar decisiones como la planificación del riego suplementario, el manejo del exceso hídrico y la elección de la fecha de siembra.

La estabilidad del ranking de rendimiento entre localidades refuerza la interpretación de que las diferencias relativas entre sitios responden, al menos en parte, a características edáficas estructurales y no únicamente a la variabilidad climática interanual. Río Branco mantuvo el primer lugar en el 97% de las zafras y Melo permaneció en el último en el 80% (Figura 13), con una correlación de Spearman media de 0,76 entre años consecutivos. Este patrón sugiere que propiedades relativamente estables del ambiente productivo, como la capacidad de almacenamiento de agua y el drenaje del suelo, condicionan de forma consistente la respuesta del cultivo bajo seco, aun en presencia de una marcada variabilidad climática entre zafras.

5.2 El clima interanual como factor dominante

El coeficiente de correlación intraclase estimado en el modelo conjunto (ICC = 0,64) indica que el 64% de la variabilidad total del rendimiento es atribuible a la variación climática interanual, lo que posiciona al clima como el principal determinante del rendimiento de soja en la región este. Este resultado es coherente con la alta variabilidad

pluviométrica caracterizada en este trabajo, con coeficientes de variación mensuales entre 46 y 79% para el período octubre-abril.

El análisis por categorías climáticas confirmó la fuerte dependencia del sistema de secano respecto a las precipitaciones. En años secos, el rendimiento bajo secano se redujo a 3.10 Mg ha^{-1} en promedio, con valores mínimos que descendieron por debajo de 1.0 Mg ha^{-1} en Melo (0.92 Mg ha^{-1}). En contraste, en años lluviosos el rendimiento bajo secano ascendió a 3.97 Mg ha^{-1} , una diferencia de 0.87 Mg ha^{-1} (+28%) respecto a los años secos.

La relación entre la fase ENSO y las categorías climáticas observadas ofrece un elemento de interés para la planificación productiva. Los resultados mostraron una asociación parcial entre los eventos Niño y las condiciones lluviosas, dado que el 43% de los años Niño fueron clasificados como lluviosos (Figura 3). Del mismo modo, el 38,9% de los años Niña correspondieron a condiciones secas. Si bien esta relación no es determinista, la fase ENSO observada durante el trimestre agosto-septiembre-octubre podría utilizarse como información complementaria para contextualizar decisiones de manejo, como el plan de fechas de siembra y grupos de madurez en una empresa (Di Mauro et al., 2022; Nória Júnior et al., 2020; Rizzo et al., 2022).

Es importante destacar, sin embargo, que la variabilidad climática no solo actúa a través del déficit hídrico, sino también mediante el exceso. En localidades con suelos de drenaje imperfecto, los años lluviosos no necesariamente se traducen en mayores rendimientos de forma proporcional, ya que el anegamiento afecta diversos procesos durante etapas vegetativas (Bacanamwo & Purcell, 1999a; Henshaw et al., 2007a; Pires et al., 2002) y en etapas reproductivas puede limitar severamente el rendimiento (Linkemer et al., 1998; Ploschuk et al., 2024; Scott et al., 1989). El modelo Cycles captura parcialmente este efecto por lo que los rendimientos simulados bajo condiciones lluviosas podrían estar sobreestimados.

5.3 El efecto estabilizador del riego

Los resultados evidenciaron que el riego ejerció un doble efecto sobre la producción de soja, al incrementar el rendimiento medio y reducir de forma sustancial la variabilidad interanual. En términos medios, la brecha riego-secano fue de 0.92 Mg ha^{-1} a nivel general, pero su magnitud se modificó notablemente en función de la categoría climática, lo cual refleja que el beneficio del riego no es constante entre zafras, sino que aumenta a medida que las precipitaciones se vuelven más deficitarias.

La reducción de la variabilidad es quizás el aspecto de mayor relevancia desde una perspectiva de gestión del riesgo productivo. Los coeficientes de variación bajo

riego fueron notablemente homogéneos entre localidades, mientras que bajo secano la dispersión fue considerablemente mayor, presentando una variabilidad aproximadamente 2,0 a 2,8 veces mayor que el riego según el sitio, lo que evidencia el rol del riego en la estabilización del rendimiento y en la menor dependencia respecto a la variabilidad climática interanual. Este efecto estabilizador adquiere especial importancia en localidades como Melo, donde el CV bajo secano (27,4%) casi triplicó al registrado bajo riego (9,9%).

La magnitud de la diferencia entre riego y secano también varió significativamente entre localidades, siendo mayor en Melo y menor en Río Branco. Estas diferencias estuvieron asociadas principalmente al comportamiento de los cultivos en secano. Melo presentó el menor rendimiento en esta condición (3.09 Mg ha^{-1}) posiblemente asociado a una mayor sensibilidad frente a la disponibilidad hídrica en el ambiente evaluado. En contraste, Río Branco alcanzó el mayor rendimiento bajo secano (4.16 Mg ha^{-1}), por lo que presentó un menor margen de respuesta al riego. Este patrón es coherente con el marco conceptual planteado por Lobell et al. (2009) quienes argumentan que una mayor restricción hídrica reduce Y_w y tiende a ampliar la diferencia respecto de Y_p .

5.4 Fecha de siembra

La tendencia observada podría explicarse, al menos parcialmente, porque las siembras tempranas permiten que el cultivo atraviese las etapas de mayor importancia para la definición del rendimiento en meses con una mayor oferta de radiación solar. En la región analizada, diciembre presentó la mayor radiación media mensual ($24,9 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$). En soja, el número de granos se define durante el período crítico de definición del rendimiento y se encuentra asociado con la radiación solar acumulada durante esta etapa (Kantolic & Slafer, 2001). Las siembras tardías desplazan este período hacia meses con una menor oferta de radiación y exponen las etapas reproductivas avanzadas a condiciones térmicas menos favorables, lo que podría contribuir a explicar la reducción del rendimiento observada con el atraso de la fecha de siembra (Calviño et al., 2003).

La fecha de siembra mostró una asociación marcada y consistente con el rendimiento. En todas las localidades y bajo ambas condiciones hídricas, el rendimiento disminuyó de forma continua desde la primera fecha evaluada (15 de octubre, DOY 288) hasta la última (30 de diciembre, DOY 364) (Figura 11). Este resultado indica que las siembras tempranas favorecen la expresión del rendimiento potencial y del rendimiento potencial limitado por agua en los ambientes evaluados.

En condiciones de secano, la pérdida de rendimiento por cada día de atraso en la fecha de siembra fue casi tres veces mayor en años lluviosos en comparación con años secos. Esto implica que, en años de déficit hídrico, el atraso en la siembra tiene un impacto relativamente menor sobre el rendimiento, lo que sugiere que la limitación hídrica restringe la expresión de las ventajas asociadas a una fecha de siembra temprana. En contraste, en años lluviosos la fecha de siembra cobra mayor relevancia bajo secano, con pérdidas de rendimiento acercándose al impacto observado bajo riego. Por el contrario, bajo condiciones de riego, las pendientes fueron más homogéneas entre categorías climáticas lo que indica que, cuando la disponibilidad hídrica está asegurada, el efecto de la fecha de siembra se expresa de forma más consistente. El mayor coeficiente de determinación bajo riego en años lluviosos ($R^2 = 0,79$) respecto al secano en años secos ($R^2 = 0,05$) demuestra cómo la fecha de siembra explica una proporción elevada de la variabilidad del rendimiento cuando el agua no es limitante, mientras que pierde relevancia cuando el déficit hídrico domina la respuesta.

Los resultados obtenidos permiten contrastar la hipótesis planteada en su totalidad en cuanto al rendimiento potencial (Y_p). Esto se debe a que las siembras tempranas (15 de octubre) maximizaron el rendimiento bajo riego en todas las localidades, alcanzando valores medios de entre 5.11 Mg ha^{-1} (Melo) y 5.84 Mg ha^{-1} (Río Branco), mientras que las siembras tardías (30 de diciembre) redujeron el rendimiento potencial a un rango de $3.29\text{-}3.75 \text{ Mg ha}^{-1}$, confirmando que las siembras tempranas maximizan el Y_p independientemente del ambiente productivo.

En cuanto al rendimiento potencial limitado por agua, las siembras tempranas presentaron una mayor variabilidad interanual, con un CV promedio de 24,3%, mientras que las siembras tardías mostraron una menor variabilidad, alcanzando un CV promedio de 18,4% en la última fecha evaluada (Tabla 6). Sin embargo, esta reducción progresiva de la variabilidad con el atraso en la fecha de siembra estuvo acompañada por una disminución de los rendimientos ubicados en el percentil 25. En efecto, el p25 se redujo desde 3.55 Mg ha^{-1} (15 de octubre) a 2.69 Mg ha^{-1} (30 de diciembre). Estos resultados indican que las fechas tardías generaron sistemas relativamente más estables, pero no mejoraron el piso productivo. Por el contrario, las siembras tempranas, aun siendo más variables, mantuvieron mayores rendimientos en el cuartil inferior de la distribución.

En este sentido, los resultados respaldan parcialmente la hipótesis planteada para Y_w . El atraso de la fecha de siembra redujo la variabilidad del rendimiento bajo secano, pero esta mayor estabilidad estuvo asociada a una disminución del piso productivo. Por lo tanto, una menor variabilidad interanual no implicó necesariamente una mejora desde el punto de vista agronómico.

Desde una perspectiva práctica, estos resultados indican que la fecha de siembra constituye una herramienta de manejo relevante para modificar el rendimiento esperado. Bajo riego, la recomendación es priorizar las siembras tempranas, ya que la disponibilidad hídrica permite expresar con mayor probabilidad el rendimiento potencial y alcanzar rendimientos superiores a los obtenidos con fechas más tardías. Bajo secano, si bien las siembras tempranas presentaron una mayor variabilidad interanual, también mantuvieron un mayor piso productivo, expresado por valores superiores del percentil 25 respecto a las fechas tardías. En consecuencia, aun cuando impliquen una mayor exposición a la variabilidad climática, estos resultados sugieren que se deberían priorizar las fechas tempranas, debido a que ofrecen mejores perspectivas de rendimiento tanto en términos medios como en la parte inferior de la distribución. No obstante, la viabilidad de esta recomendación en la práctica está condicionada por factores operativos como la disponibilidad de maquinaria, las condiciones de implantación del cultivo antecesor, y los riesgos de daños por heladas tardías en etapas de emergencia, entre otros factores. En este sentido, los resultados sugieren que, ante la imposibilidad de sembrar temprano, el período de menor penalización relativa por atraso sería en años secos bajo secano, donde la pérdida de rendimiento es mínima. En cambio, en años lluviosos o bajo riego, el costo de un atraso es considerablemente mayor y justifica un esfuerzo adicional por adelantar la siembra.

5.5 Limitaciones del estudio

El presente estudio presenta un conjunto de limitaciones que deben considerarse en la interpretación de los resultados. En primer lugar, todos los datos provienen de simulaciones con el modelo Cycles, lo que implica que la variabilidad observada entre zafras se atribuye exclusivamente al forzante climático histórico, sin considerar error experimental aleatorio. A su vez, el diseño experimental simulado no considera la variabilidad espacial dentro de cada unidad de suelo y supone un manejo ideal, sin limitaciones de nutrientes, plagas, enfermedades o malezas. Bajo riego, este escenario corresponde al rendimiento potencial (Y_p), mientras que bajo secano representa el rendimiento potencial limitado por agua (Y_w). Si bien el uso de datos simulados permite explorar un amplio espacio de condiciones edáficas, climáticas y de manejo de forma controlada (van Ittersum et al., 2013), los resultados deben interpretarse como estimaciones del comportamiento esperado del sistema bajo los supuestos del modelo, y no como valores absolutos de rendimiento. Del mismo modo, debido a la falta de datos de experimentos de campo en condiciones de potencial, las simulaciones con el modelo no pudieron ser validadas.

En segundo lugar, el modelo Cycles no contempla la mortalidad del cultivo por anegamiento y podría subestimar el impacto del exceso hídrico sobre el rendimiento (A. Kemanian, comunicación personal, s.f.; Shaw et al., 2013). Esta limitación es particularmente relevante al analizar los resultados de Y_w , el cual puede verse afectado tanto por déficit como por exceso hídrico (van Ittersum & Rabbinge, 1997), motivo por el cual los valores de Y_w simulados podrían estar sobreestimados. Del mismo modo, en aquellas localidades con drenaje imperfecto donde se pueden generar condiciones de saturación prolongadas en años lluviosos, los rendimientos simulados bajo esta característica climática también podrían estar sobreestimados, y la brecha entre años secos y lluviosos podría ser menor a la observada en las simulaciones. A su vez, se debe tener en cuenta al analizar los resultados que, la información de los perfiles obtenidos de la carta 1:1000000 son indisturbados y que el manejo en suelos de lomadas es habitualmente bajo siembra directa y en zonas bajas se realiza laboreo continuo (por presencia del cultivo de arroz), medidas de manejo no consideradas en el diseño experimental y que podrían tener cierto impacto en el rendimiento del cultivo. Por último, para diferenciar el efecto suelo del efecto clima se podría haber relacionado mas de una unidad de suelo a cada localidad y poder así evaluar su efecto en los resultados presentados.

En tercer lugar, el estudio se limitó a un único grupo de madurez (GM VI), que representa el de mayor adopción en la región (URUPOV, 2025). La evaluación de otros grupos de madurez permitiría analizar en qué medida cultivares con ciclos contrastantes pueden aprovechar mejor la disponibilidad de agua bajo riego o presentar un comportamiento más favorable frente a condiciones de déficit hídrico. En este sentido, futuros trabajos deberían explorar la interacción entre el grupo de madurez, la fecha de siembra y la condición hídrica, con el objetivo de ampliar las recomendaciones de manejo para diferentes sistemas productivos de la región.

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos mediante el modelo Cycles respaldan parcialmente la hipótesis planteada. En los ambientes evaluados, las siembras tempranas favorecieron la expresión del rendimiento potencial (Y_p) y del rendimiento potencial limitado por agua (Y_w). El rendimiento disminuyó progresivamente a medida que se atrasó la fecha de siembra desde mediados de octubre hasta fines de diciembre, tanto bajo riego como en seco. Por lo tanto, dentro del rango evaluado, las siembras tempranas constituyeron la estrategia más favorable para maximizar la productividad del cultivo de soja.

Bajo seco, las siembras tempranas presentaron una mayor variabilidad interanual, con un coeficiente de variación promedio de 24,3%, mientras que las fechas tardías mostraron una menor variabilidad, alcanzando un CV de 18,4% en la última fecha evaluada. Sin embargo, esta mayor estabilidad relativa estuvo acompañada por una disminución del rendimiento. El percentil 25 disminuyó de 3.55 $Mg\ ha^{-1}$ en la siembra del 15 de octubre a 2.69 $Mg\ ha^{-1}$ en la del 30 de diciembre. En consecuencia, si bien el atraso de la siembra redujo la variabilidad relativa de Y_w , el rendimiento alcanzado en el cuartil inferior de la distribución también disminuyó.

A escala regional, el rendimiento potencial promedio fue de 4.53 $Mg\ ha^{-1}$, mientras que el rendimiento potencial limitado por agua alcanzó 3.61 $Mg\ ha^{-1}$. No obstante, ambos indicadores variaron entre localidades. Río Branco presentó los mayores rendimientos tanto bajo riego como en seco, mientras que Melo registró los menores valores. Esta diferenciación entre ambientes fue consistente en el tiempo, dado que Río Branco ocupó el primer lugar del ranking bajo seco en 62 de las 64 zafras evaluadas, mientras que Melo se ubicó en el último lugar en el 79,7% de las zafras. Estas diferencias evidencian que el comportamiento productivo de la soja depende de las características particulares de cada ambiente y que las recomendaciones de manejo no deberían aplicarse de manera uniforme para toda la región.

La variabilidad climática interanual tuvo una influencia importante sobre el rendimiento, especialmente bajo seco. En años secos, el Y_w fue 22% menor que en años lluviosos (3.97 $Mg\ ha^{-1}$), lo que representa una diferencia de 0.87 $Mg\ ha^{-1}$. Asimismo, el efecto del atraso de la fecha de siembra dependió de la condición climática debido a que bajo condiciones de seco, la penalización fue menor en años secos y aumentó considerablemente en años lluviosos.

El riego incrementó el rendimiento medio y redujo la variabilidad entre zafras. La diferencia promedio entre riego y seco fue de 0.92 $Mg\ ha^{-1}$, aunque su magnitud dependió del ambiente y de la condición climática. El beneficio del riego fue mayor en

años secos, con una diferencia de 1.53 Mg ha^{-1} respecto al secano, y disminuyó a 0.44 Mg ha^{-1} en años lluviosos. Además, los coeficientes de variación bajo riego se situaron entre 7,2 y 9,9% según la localidad, mientras que bajo secano variaron entre 16,5 y 27,4%. Por lo tanto, el aporte del riego no se limita al incremento del rendimiento esperado, sino que también contribuye a estabilizar la producción y a reducir la dependencia respecto a la variabilidad climática interanual.

La asociación entre la fase ENSO previa al verano (trimestre ASO) y las categorías climáticas observadas constituye un resultado de interés para la planificación productiva, ya que ofrece información anticipada, si bien parcial, sobre el régimen hídrico de la estación de crecimiento. Si bien esta asociación no es determinista, su incorporación como información contextual puede contribuir a orientar decisiones de manejo en la región.

Desde una perspectiva productiva, las siembras tempranas son la estrategia recomendada bajo ambas condiciones hídricas: maximizan el rendimiento medio y sostienen un mayor piso productivo también bajo secano, aunque con mayor variabilidad interanual. El atraso de la siembra no debería considerarse una estrategia para reducir el riesgo, dado que el percentil 25 del rendimiento también disminuye. La viabilidad práctica de la siembra temprana estará condicionada por factores operativos (maquinaria, antecesor, condiciones de implantación, riesgo de heladas tardías).

Finalmente, los resultados deben interpretarse dentro de los supuestos del modelo utilizado. La representación parcial del efecto del anegamiento, la asociación entre cada localidad y una única unidad de suelo y la evaluación exclusiva de un cultivar GM VI medio limitan la extrapolación de los resultados a situaciones productivas de la región. Futuros trabajos deberían complementar las simulaciones con validaciones experimentales y explorar la interacción entre la fecha de siembra, la condición hídrica y otros grupos de madurez que permitan aprovechar mejor la disponibilidad de agua bajo riego o presentar un comportamiento más favorable frente a condiciones de déficit hídrico. Asimismo, sería relevante evaluar el rendimiento de la soja luego de diferentes antecesores, incluyendo cultivos de grano y pasturas, con el objetivo de cuantificar su impacto sobre la productividad y contribuir al diseño de rotaciones agrícolas adaptadas a las condiciones de la región este.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Altamirano, A., Da Silva, H., Durán, A., Echevarría, A., Panario, D., & Puentes, R. (1976). *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay: Vol. 1. Clasificación de suelos del Uruguay*. MAP.
- Arbeletche, P. (2020). El agronegocio en Uruguay: Su evolución y estrategias cambiantes del siglo XXI. *RIVAR*, 7(19), 109-129.
<https://www.scielo.cl/pdf/rivar/v7n19/0719-4994-rivar-7-19-109.pdf>
- Arbeletche, P., Ernst, O., & Hoffman, E. (2010). La agricultura en Uruguay y su evolución. En F. García Préchac, O. Ernst, P. Arbeletche, M. Pérez Bidegain, C. Pritsch, A. Ferenczi, & M. Rivas (Eds.), *Intensificación agrícola: oportunidades y amenazas para un país productivo y natural* (pp. 13-27). Universidad de la República. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/9510>
- Arenare, L., Couto, P., & Fontán, M. V. (2018). *Informe sobre riego en Uruguay*. MGAP. https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/publicaciones/informe_riego_en_uruguay_1.pdf
- Ashraf, M., & Arfan, M. (2005). Gas exchange characteristics and water relations in two cultivars of *Hibiscus esculentus* under waterlogging. *Biologia Plantarum*, 49(3), 459-462. <https://doi.org/10.1007/s10535-005-0029-2>
- Asociación Civil Uruguay para la Protección de los Obtentores Vegetales. (2021). *Teledetección y caracterización del cultivo de soja en Uruguay*.
<https://www.urupov.org.uy/wp-content/uploads/2022/05/Teledeteccion-y-caracterizacion-del-cultivo-de-soja-URUPOV-2021.pdf>
- Asociación Civil Uruguay para la Protección de los Obtentores Vegetales. (2023). *Teledetección y caracterización del cultivo de soja en Uruguay*.
<https://www.urupov.org.uy/wp-content/uploads/2023/08/URUPOV-Informe-teledeteccion-Soja-2023.pdf>
- Asociación Civil Uruguay para la Protección de los Obtentores Vegetales. (2024). *Teledetección y caracterización del cultivo de soja en Uruguay*.
https://www.urupov.org.uy/wp-content/uploads/2024/07/URUPOV_Informe-Soja_Teledeteccion-Characterizacion-23-24.pdf

- Asociación Civil Uruguay para la Protección de los Obtentores Vegetales. (2025). *Teledetección y caracterización del cultivo de soja en Uruguay*. <https://www.urupov.org.uy/wp-content/uploads/2025/06/URUPOV-Informe-teledeteccion-SOJA-2025.pdf>
- Bacanamwo, M., & Purcell, L. C. (1999a). Soybean dry matter and N accumulation responses to flooding stress, N sources and hypoxia. *Journal of Experimental Botany*, 50(334), 689-696. <https://doi.org/10.1093/jxb/50.334.689>
- Bacanamwo, M., & Purcell, L. C. (1999b). Soybean root morphological and anatomical traits associated with acclimation to flooding. *Crop Science*, 39(1), 143-149. <https://doi.org/10.2135/cropsci1999.0011183x003900010023x>
- Bailey-Serres, J., & Voesenek, L. A. C. J. (2008). Flooding stress: Acclimations and genetic diversity. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 313-339. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092752>
- Calviño, P. A., Sadras, V. O., & Andrade, F. H. (2003). Development, growth and yield of late-sown soybean in the southern Pampas. *European Journal of Agronomy*, 19(2), 265-275. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00050-3](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00050-3)
- Cassman, K. G. (1999). Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 96(11), 5952-5959. <https://doi.org/10.1073/pnas.96.11.5952>
- Cassman, K. G., Dobermann, A., Walters, D. T., & Yang, H. (2003). Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. *Annual Review of Environment and Resources*, 28(1), 315-358. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.040202.122858>
- Collaku, A., & Harrison, S. A. (2002). Losses in wheat due to waterlogging. *Crop Science*, 42(2), 444-450. <https://doi.org/10.2135/cropsci2002.4440>
- Deambrosi, E. (1984). *El cultivo de soja en la zona este*. MAP; CIAAB. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/5978/1/UY.CIAAB.MISCELANEA.1984.no.61.pdf>
- Di Mauro, G., Parra, G., Santos, D. J., Enrico, J. M., Zuil, S., Murgio, M., Zbinden, F., Costanzi, J., Arias, N., Carrio, A., Vissani, C., Fuentes, F., & Salvagiotti, F. (2022). Defining soybean maturity group options for contrasting weather scenarios in the American Southern Cone. *Field Crops Research*, 287, Artículo e108676. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108676>

- Drew, M. C. (1983). Plant injury and adaptation to oxygen deficiency in the root environment: A review. *Plant and Soil*, 75(2), 179-199.
<https://doi.org/10.1007/BF02375564>
- Durán, A., & García Préchac, F. (2007). *Suelos del Uruguay: Origen, clasificación, manejo y conservación* (Vol. 1). Hemisferio Sur.
- Evans, L. T., & Fisher, R. A. (1999). Yield potential: Its definition, measurement, and significance. *Crop Science*, 39(6), 1544-1551.
<https://doi.org/10.2135/cropsci1999.3961544x>
- Facultad de Agronomía. (s.f.). *Visor de la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay escala 1: 1 Millón*. Universidad de la República.
<https://museovirtualdesuelos.net/suelos-del-uruguay/cartamillon/>
- Ferrari, J. M. (2003). *La agricultura de secano en Uruguay: Contribución a su conocimiento*. MGAP. https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-02/la_agricultura_de_secano_en_uruguay_-_junio_2003.pdf
- Fischer, R. A. (2015). Definitions and determination of crop yield, yield gaps, and of rates of change. *Field Crops Research*, 182, 9-18.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.12.006>
- Giménez, L. (2014). Efecto de las deficiencias hídricas en diferentes etapas de desarrollo sobre el rendimiento de soja. *Agrociencia (Uruguay)*, 18(1), 53-64.
<https://doi.org/10.31285/AGRO.18.439>
- Greenway, H., & Setter, T. (1996). Is there anaerobic metabolism in submerged rice plants? A view point. En V. P. Singh., R. K. Singh., B. B. Singh., & R. S. Zeiger (Eds.), *Physiology of stress tolerance in rice* (pp. 11-30). Narendra Deva University of Agriculture and Technology; IRRI. https://books.google.com.uy/books?hl=es&lr=&id=Gb3ldbwHr0gC&oi=fnd&pg=PA11&ots=8_6HJeCrKj&sig=e8fGtPyO32Tr5-7XGuf36Fnrbm8&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Henshaw, T. L., Gilbert, R. A., Scholberg, J. M. S., & Sinclair, T. R. (2007a). Soya bean (*Glycine max* L. Merr.) genotype response to early-season flooding: I. Root and nodule development. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 193(3), 177-188.
<https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2007.00257.x>

- Henshaw, T. L., Gilbert, R. A., Scholberg, J. M. S., & Sinclair, T. R. (2007b). Soya bean (*Glycine max* L. Merr.) genotype response to early-season flooding: II. Aboveground growth and biomass. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 193(3), 189-197. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2007.00258.x>
- Hernández, N., Soto, F., & Caballero, A. (2009). Modelos de simulación de cultivos: Características y usos. *Cultivos Tropicales*, 30(1), 73-82. <https://doaj.org/article/2616e8b32401494e8db50376afe41bd9>
- Hoogenboom, G. (2000). Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103(1-2), 137-157. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00108-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00108-8)
- INIA Uruguay. (2023). *Intensificación sostenible de la ganadería y la agricultura - Sistemas integrados en la región este* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=FOhI9bRi9d0>
- Kantolic, A. G., & Slafer, G. A. (2001). Photoperiod sensitivity after flowering and seed number determination in indeterminate soybean cultivars. *Field Crops Research*, 72(2), 109-118. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(01\)00168-X](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(01)00168-X)
- Kemanian, A. R., Shi, Y., White, C. M., Montes, F., Stöckle, C. O., Huggins, D. R., Cangiano, M., Stefani-Faé, G., & Nydegger Rozum, R. K. (2024). The Cycles agroecosystem model: Fundamentals, testing, and applications. *Computers and Electronics in Agriculture*, 227, Artículo e109510. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109510>
- Kemanian, A. R., White, C. M., Shi, Y., & Stöckle, C. O. (s.f.). *Cycles* (Versión 1.4.4) [Software]. Penn State College of Agricultural Sciences. <https://plantscience.psu.edu/research/labs/kemanian/models-and-tools/cycles>
- Li, Y., Guan, K., Schnitkey, G. D., DeLucia, E., & Peng, B. (2019). Excessive rainfall leads to maize yield loss of a comparable magnitude to extreme drought in the United States. *Global Change Biology*, 25(7), 2325-2337. <https://doi.org/10.1111/gcb.14628>
- Linkemer, G., Board, J. E., & Musgrave, M. E. (1998). Waterlogging effects on growth and yield components in late-planted soybean. *Crop Science*, 38(6), 1576-1584. <https://doi.org/10.2135/cropsci1998.0011183X003800060028x>
- Lobell, D. B. (2013). The use of satellite data for crop yield gap analysis. *Field Crops Research*, 143, 56-64. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.08.008>

- Lobell, D. B., Cassman, K. G., & Field, C. B. (2009). Crop yield gaps: Their importance, magnitudes, and causes. *Annual Review of Environment and Resources*, 34, 179-204. <https://doi.org/10.1146/annurev.envIRON.041008.093740>
- Macedo, I., Castillo, J., Saldain, N. E., Martínez, S., Ayala, W., Hernández, J., Serrón, N., Bordagorri, A., Zorrilla, G., Terra, J. (2016). Nuevas rotaciones arroceras: Primeros datos de productividad. *Arroz*, (88), 34-39. <https://www.aca.com.uy/revista-no-88/>
- Macedo, I., & Terra, J. A. (2014). Respuesta del cultivo de soja al anegamiento. En *Arroz-Soja: Resultados experimentales 2013-2014* (pp. 99-101). INIA. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/3336/1/Ad-735.pdf>
- Molfino, J. H., & Califra, A. (2001). *Agua disponible de las tierras del Uruguay: Segunda aproximación*. 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)
- Nóia Júnior, R. de S., Fraisse, C. W., Karrei, M. A. Z., Cerbaro, V. A., & Perondi, D. (2020). Effects of the El Niño Southern Oscillation phenomenon and sowing dates on soybean yield and on the occurrence of extreme weather events in southern Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology*, 290, Artículo e108038. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108038>
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2024). *Anuario estadístico agropecuario 2024*. MGAP. <https://descargas.mgap.gub.uy/DIEA/Anuarios/Anuario2024/Anuario2024/%20ANUARIO2024.pdf>
- Oosterhuis, D. M., Scott, H. D., Hampton, R. E., & Wulschleger, S. D. (1990). Physiological responses of two soybean [*Glycine max* (L.) Merr] cultivars to short-term flooding. *Environmental and Experimental Botany*, 30(1), 85-92. [https://doi.org/10.1016/0098-8472\(90\)90012-S](https://doi.org/10.1016/0098-8472(90)90012-S)
- Pires, J. L. F., Soprano, E., & Cassol, B. (2002). Adaptações morfofisiológicas da soja em solo inundado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 37(1), 41-50. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2002000100006>
- Ploschuk, R. A., Miralles, D. J., Kavanová, M., & Striker, G. G. (2024). Identifying the numerical components affecting soybean (*Glycine max*) yield under waterlogging at reproductive stages. *Journal of Agronomy & Crop Science*, 210(5), Artículo e12764. <https://doi.org/10.1111/jac.12764>

- Pravia, V., Salvo, L., Álvarez, S., Mazzilli, S., Quincke, A., Riccetto, S., Ciganda, V., Ernst, O., Terra, J. A., & Kemanian, A. R. (2024). Modelación del balance de carbono y nitrógeno en el suelo y gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas y ganaderos. *Revista INIA*, (79), 79-83.
<https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/17993/1/Revista-INIA-79-Diciembre-2024-20.pdf>
- Regadores Unidos del Uruguay. (2025). *Jornada Sistemas Regados - RUU 2025* [Video]. Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=qU_nIU-41OI&t=6603s
- Rizzo, G., & Ernst, O. (2018). Mapeando la brecha de rendimiento en soja para diferentes zonas climáticas y grupos de suelos. *Cangüé*, (41), 10-14.
https://cangue.eemac.edu.uy/?download_pdf=1&pdf_id=152
- Rizzo, G., Mazzilli, S. R., Ernst, O., Baethgen, W. E., & Berger, A. G. (2022). Season-specific management strategies for rainfed soybean in the South American Pampas based on a seasonal precipitation forecast. *Agricultural Systems*, 196, Artículo e103331. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103331>
- 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>
- Rizzo Ayphassorho, G. D. (2018). *Estimación y análisis espaciotemporal del rendimiento y las brechas de rendimiento de soja en Uruguay* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/29206>
- Sallam, A., & Scott, H. D. (1987). Effects of prolonged flooding on soybeans during early vegetative growth. *Soil Science*, 144(1), 61-66.
<https://www.ovid.com/00010694-198707000-00010>
- Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1569-1578. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>
- Scott, H. D., DeAngulo, J., Daniels, M. B., & Wood, L. S. (1989). Flood duration effects on soybean growth and yield. *Agronomy Journal*, 81(4), 631-636.
<https://doi.org/10.2134/agronj1989.00021962008100040016x>
- Severini, A., Álvarez Prado, S., Otegui, M. E., Vega, C., Zuil, S., Kavanová, M., Ceretta, S., Acreche, M., Scholz Dodowski, R., Serrago, R., Miralles, F., Alfaro, C., Gonzalez, F., & Fernandez Long, M. E. (s.f.). *CronosojáUY* [Software]. Universidad de Buenos Aires. <https://cronosojá.agro.uba.ar/>

- Shaw, R. E., Meyer, W. S., McNeill, A., & Tyerman, S. D. (2013). Waterlogging in Australian agricultural landscapes: A review of plant responses and crop models. *Crop and Pasture Science*, 64(6), 549-562.
<https://doi.org/10.1071/CP13080>
- Shimamura, S., Mochizuki, T., Nada, Y., & Fukuyama, M. (2003). Formation and function of secondary aerenchyma in hypocotyl, roots and nodules of soybean (*Glycine max*) under flooded conditions. *Plant and Soil*, 251(2), 351-359.
<https://doi.org/10.1023/A:1023036720537>
- Smucker, A. J. M. (1984). Carbon utilization and losses by plant root systems. En S. A. Barber & D. R. Bouldin (Eds.), *Roots, nutrient and water influx, and plant growth* (pp. 27-46). ASA; CSSA; ASA. <https://doi.org/10.2134/asaspecpub49.c2>
- Terra, J. A., Castillo, J., Bonilla, F., Amaral, R., Lucas, T., & Macedo, I. (2014). Soja en sistemas arroceros. *Arroz*, 78, 24-27.
<https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/3360/1/RevistaArroz-2014-78-p.24-27.pdf>
- Terra, J. A., Pravia, V., Roel, A., & Correa, J. (2009). Impacto de la intensidad de uso de suelo sobre la productividad del cultivo de soja en Lomadas del Este. En *Cultivos Forrajeros: Resultados Experimentales 2008-2009* (pp. 1-18). INIA.
<https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/9195/1/ad-580.pdf>
- Thomas, A. L., Guerreiro, S. M. C., & Sodek, L. (2005). Aerenchyma formation and recovery from hypoxia of the flooded root system of nodulated soybean. *Annals of Botany*, 96(7), 1191-1198. <https://doi.org/10.1093/aob/mci272>
- van Bussel, L. G. J., Grassini, P., Van Wart, J., Wolf, J., Claessens, L., Yang, H., Boogaard, H., de Groot, H., Saito, K., Cassman, K. G., & van Ittersum, M. K. (2015). From field to atlas: Upscaling of location-specific yield gap estimates. *Field Crops Research*, 177, 98-108. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.005>
- van Ittersum, M. K., & Rabbinge, R. (1997). Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Research*, 52(3), 197-208. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(97\)00037-3](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00037-3)
- van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Titttonell, 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>

Zahra, N., Hafeez, M. B., Shaukat, K., Wahid, A., Hussain, S., Naseer, R., Raza, A., Iqbal, S., & Farooq, M. (2021). Hypoxia and anoxia stress: Plant responses and tolerance mechanisms. *Journal of Agronomy & Crop Science*, 207(2), 249-284.
<https://doi.org/10.1111/jac.12471>

8. ANEXOS

Anexo A.

Rendimiento estimado y brecha entre sistemas por localidad, obtenidos mediante el modelo lineal mixto

Localidad	Secano - Media [IC95%] (Mg ha ⁻¹)	Riego - Media [IC95%] (Mg ha ⁻¹)	Brecha [IC95%] (Mg ha ⁻¹)	Grupo
Melo	3.09 [2.92; 3.27]	4.23 [4.13; 4.33]	1.134 [0.983; 1.285]	a
Rincón de Ramírez	3.66 [3.49; 3.84]	4.66 [4.56; 4.76]	0.997 [0.845; 1.148]	b
Treinta y Tres	3.65 [3.48; 3.83]	4.55 [4.45; 4.65]	0.898 [0.747; 1.049]	b
Velázquez	3.50 [3.32; 3.67]	4.40 [4.30; 4.49]	0.902 [0.751; 1.054]	b
Río Branco	4.16 [3.98; 4.33]	4.83 [4.73; 4.92]	0.672 [0.521; 0.824]	c

Nota. IC95%: intervalo de confianza al 95%. Letras distintas indican diferencias significativas entre localidades en la brecha (prueba de Tukey, $\alpha = 0.05$).

Anexo B.

Rendimiento mínimo, medio y máximo de soja por localidad, sistema hídrico y condición climática

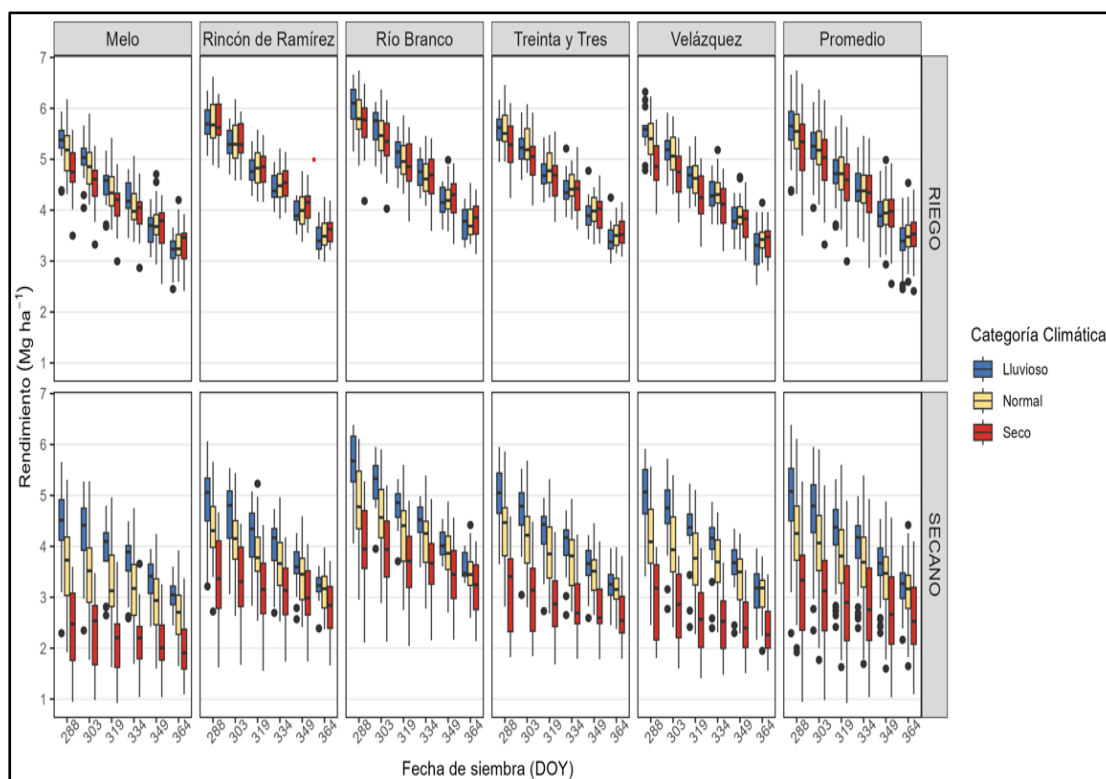
Localidad	Sist. Hídrico	Condición Climática	Mínimo	Media	Máximo	CV%
Melo	SEC	Lluvioso	2.29	3.77	5.65	20.4
Melo	SEC	Normal	1.60	3.20	5.31	24.7
Melo	SEC	Seco	0.92	2.21	3.69	32.1
Melo	RIE	Lluvioso	2.45	4.32	5.94	19.2
Melo	RIE	Normal	2.59	4.27	6.18	18.0
Melo	RIE	Seco	2.41	4.06	5.57	17.1
Rincón de Ramírez	SEC	Lluvioso	2.39	4.06	6.06	20.8
Rincón de Ramírez	SEC	Normal	2.37	3.76	5.66	19.1
Rincón de Ramírez	SEC	Seco	1.55	3.08	4.67	25.5
Rincón de Ramírez	RIE	Lluvioso	3.03	4.61	6.35	17.8
Rincón de Ramírez	RIE	Normal	2.99	4.67	6.62	17.8
Rincón de Ramírez	RIE	Seco	3.22	4.69	6.28	16.7
Río Branco	SEC	Lluvioso	3.28	4.64	6.39	17.5
Río Branco	SEC	Normal	2.60	4.17	6.11	18.9
Río Branco	SEC	Seco	2.04	3.65	5.28	21.9
Río Branco	RIE	Lluvioso	3.26	4.91	6.66	17.7

Localidad	Sist. Hídrico	Condición Climática	Mínimo	Media	Máximo	CV%
Río Branco	RIE	Normal	3.33	4.83	6.75	16.8
Río Branco	RIE	Seco	3.14	4.75	6.48	17.0
Treinta y Tres	SEC	Lluvioso	2.45	4.12	5.95	19.4
Treinta y Tres	SEC	Normal	2.38	3.78	5.86	18.8
Treinta y Tres	SEC	Seco	1.68	2.92	4.59	26.1
Treinta y Tres	RIE	Lluvioso	2.95	4.55	6.17	17.7
Treinta y Tres	RIE	Normal	3.15	4.60	6.46	17.0
Treinta y Tres	RIE	Seco	3.09	4.43	6.11	16.1
Velázquez	SEC	Lluvioso	2.16	4.08	5.92	22.3
Velázquez	SEC	Normal	1.95	3.64	5.57	20.9
Velázquez	SEC	Seco	1.41	2.62	3.99	28.1
Velázquez	RIE	Lluvioso	2.53	4.46	6.32	19.4
Velázquez	RIE	Normal	2.96	4.48	6.24	17.1
Velázquez	RIE	Seco	2.81	4.17	5.78	17.1

Nota. Los valores presentados corresponden a estadísticos descriptivos calculados a partir de los datos crudos de simulación ($n = 96$ para años secos y lluviosos; $n = 192$ para años normales). Las medias aquí reportadas pueden diferir de las medias marginales estimadas por el modelo mixto presentadas en el texto, dado que estas últimas se controlan por el efecto de localidad, zafra y fecha de siembra.

Anexo C.

Distribución del rendimiento de soja por localidad, condición hídrica, categoría climática y fecha de siembra



Nota. La distribución presentada corresponde a los datos crudos de simulación. Cada caja representa la distribución del rendimiento sobre las zafras correspondientes a cada combinación de categoría climática y fecha de siembra.